UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

UN MODÈLE DE PLANIFICATION GLOBALE POUR LE TRANSPORT ROUTIER DES MARCHANDISES

par

Jacques Roy

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

CASE POSTALE 6128, SUCCURSALE A, MONTRÉAL, QUÉBEC, H3C 3J7

UN MODÈLE DE PLANIFICATION GLOBALE POUR LE TRANSPORT ROUTIER DES MARCHANDISES

par

Jacques Roy

Thèse présentée à l'École des Hautes Études Commerciales
en vue de l'obtention du grade de Ph.D.

Université de Montréal
Centre de recherche sur les transports - Publication #402
Décembre 1984

Dépôt légal - 2e trimestre 1985

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES i

LISTE DES FIGURES iv

LISTE DES TABLEAUX v

RESUME vii

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1: LE TRANSPORT ROUTIER DES MARCHANDISES 5

1.1 L'environnement particulier 5

1.1.1 Les facteurs régissant une entreprise de transport . 5
1.1.2 La réglementation et son influence sur les marchés et les tarifs 10
1.1.3 La concurrence et l'importance relative des tarifs et des niveaux de service 13
1.1.4 Quelques particularités des coûts dans l'industrie du camionnage 21

1.2 Les opérations de transport de marchandises 23

1.3 La gestion d'un système de transport 27

1.3.1 Les systèmes d'information 28
1.3.2 Les mesures de performance 31
1.3.3 Les systèmes d'aide à la prise de décision 34

1.4 La nécessité d'une approche globale aux problèmes de transport 38

CHAPITRE 2: LE PROBLEME DE LA PLANIFICATION GLOBALE 41

2.1 Définition du problème 41

2.1.1 L'horizon temporel de planification 44
2.1.2 L'objet de notre recherche 47

2.2 Etat actuel des connaissances 48

2.2.1 Les modèles d'évaluation 49
2.2.2 Le modèle de Powell et Sheffi 53
2.2.3 Le modèle de Crainic 59

CHAPITRE 3: UN MODELE DE PLANIFICATION GLOBALE 62

3.1 Les paramètres du modèle 62

3.1.1 Les marchés 63
3.1.2 Les modes de transport intercité 64
3.1.3 Le réseau de services 65
3.1.4 Les itinéraires 66
3.1.5 Les variables de décision 67

3.2 Les contraintes du modèle 67

3.2.1 Contrainte de demande 67
3.2.2 Contrainte de capacité 68
3.2.3 Résumé des contraintes 72

3.3 La fonction objectif 73

3.3.1 Les coûts de transport intercité 73
3.3.2 Les coûts de manutention dans les terminus de consolidation 74
3.3.3 Les coûts de pénalité associés au niveau de service 75

3.4 Dérivation des éléments du temps de transit 87

3.4.1 Délais de fréquence et leur variance 87
3.4.2 Les temps de classification et leur variance 95
3.4.3 Les temps de manutention à destination et leur variance 100

3.5 Le modèle 101

3.6 Le problème du retour à vide des remorques 103

3.7 Conclusions 105

CHAPITRE 4: RESOLUTION ET EXPERIMENTATION DU MODELE 109

4.1 Méthodes de résolution 109

4.1.1 Détermination des fréquences de service 111
4.1.2 Distribution du fret 114
4.1.3 Le rééquilibrage du réseau 118

4.2 Expérimentation 121

4.2.1 Les données du problème-test 121
4.2.2 Résolution du problème-test 128
4.2.3 Validation et analyse des résultats 134

CHAPITRE 5: LES ANALYSES DE SENSIBILITE 146

5.1 Résultats obtenus en faisant varier les paramètres du modèle 146

5.1.1 Variations de la demande 147
5.1.2 Variations de la capacité des services de transport 153
5.1.3 Variations de la productivité des employés de manutention 156

5.2 Relations entre les coûts d'opération et les niveaux de service 159

5.2.1 Variations du coût de pénalité C_m 159
5.2.2 Variations de la fiabilité et des normes de service requises 161

5.3 Quelques analyses de scénario 166

5.3.1 Modifications apportées au service de transport par rail 166
5.3.2 Modifications apportées à la configuration du réseau 170

CONCLUSION 177

REMERCIEMENTS 182

BIBLIOGRAPHIE 185

LISTE DES FIGURES

I	L'environnement particulier d'une entreprise de transport	6
II	Cheminement typique de marchandises en lots brisés	24
III	La gestion d'un système de transport	29
IV	La gestion d'un système de transport appuyée d'un système d'aide à la prise de décision	37
V	Exemple de calcul des temps moyens de transit	79
VI	Histogramme du temps entre les arrivées de remorques à un terminus typique	98
VII	Distribution des marchés selon leur importance relative	130
VIII	Relation entre les coûts d'opération et la performance de service	162

LISTE DES TABLEAUX

I	Revenu par tonne - Groupe de 477 transporteurs des Etats-Unis et la Compagnie United Parcel Service	9
II	L'importance relative des différents facteurs dans le choix d'un transporteur au Canada	17
III	Les critères de sélection utilisés pour évaluer les entreprises de camionnage aux Etats-Unis	18
IV	Les facteurs déterminant le choix des transporteurs et du mode de transport utilisés selon une enquête auprès de 351 expéditeurs américains	19
V	L'importance relative des variables de marketing telle que perçue par différents transporteurs américains	20
VI	L'importance relative des variables du marketing telle que perçue par les transporteurs routiers américains et leurs clients	22
VII	Aire sous la courbe normale centrée et réduite	84
VIII	Valeurs de n pour différents niveaux de fiabilité et selon deux cas limite	86
IX	Valeurs de $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ en fonction de la capacité des remorques, α_ℓ, et de leur taux d'utilisation, $\rho = X_\ell/\alpha_\ell F_\ell$, pour des départs à toutes les 12 hres	89
X	Valeurs de $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ lorsque $\rho < 0.80$	92
XI	Valeurs réelles et approximatives de $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ en fonction du taux d'utilisation des remorques ρ pour $\alpha_\ell = 50$.	94
XII	Les modes de transport utilisés par la compagnie CNX	123
XIII	Le temps d'exécution des modules de solution	129
XIV	Comparaison des résultats obtenus à l'aide de différentes stratégies de solution pour le rééquilibrage du réseau	133
XV	Comparaison entre les résultats de la compagnie CNX et ceux obtenus à l'aide du modèle (données d'octobre 1982)	138
XVI	Résultats obtenus selon deux cas, avant et après le rééquilibrage du réseau	142

XVII	Résultats obtenus en faisant varier les coûts unitaires de pénalité pour insatisfaction des marchés	143
XVIII	Résultats obtenus en faisant varier le niveau général de la demande	148
XIX	Résultats obtenus en faisant varier la capacité des services de transport	154
XX	Résultats obtenus en faisant varier la productivité des employés de manutention	157
XXI	Résultats obtenus en faisant varier le coût de pénalité C_m .	160
XXII	Résultats obtenus en faisant varier la fiabilité P_m et les normes de service S_m	164
XXIII	Résultats obtenus en éliminant les services quittant le terminus de Toronto et empruntant le rail comme mode de transport	167
XXIV	Résultats obtenus en augmentant le temps requis pour le transport T_ℓ pour tous les services utilisant le rail	169
XXV	Résultats obtenus en ajoutant un terminus de consolidation à Toronto	172
XXVI	Résultats obtenus en faisant varier la productivité dans le nouveau terminus de consolidation à Toronto	174
XXVII	Résultats obtenus en rééquilibrant le réseau selon différents scénarios	175

RESUME

Cette thèse propose un nouveau modèle de planification globale des opérations de transport routier des marchandises en lots brisés. En particulier, notre modèle sert à déterminer, pour une période de planification donnée,

1) quels services de transport un transporteur devrait offrir et avec quelle fréquence;

2) quel(s) itinéraire(s) devrait emprunter la marchandise, de son origine à sa destination finale;

3) comment réduire les coûts associés au retour à vide des remorques.

L'outil que nous proposons n'est pas conçu pour la planification à très court terme mais s'insère plutôt dans le processus de planification tactique des opérations. De plus, nous excluons de notre étude les opérations de cueillette et livraison de marchandises pour nous concentrer uniquement sur les opérations de transport intercité et de manutention dans les terminus, soit celles qui varient en fonction du plan global de fréquence et des itinéraires choisis.

Le modèle proposé a la forme générale d'un modèle d'optimisation non-linéaire mixte et adopte une approche systémique en cherchant un compromis entre la minimisation des coûts d'opération et la recherche d'un service rapide et fiable. Pour ce faire, nous avons apporté un soin particulier à la modélisation des phénomènes de files d'attente dans la for-

mulation des éléments de coûts de pénalité de service au niveau de la fonction objectif du modèle.

L'algorithme de solution utilisé est essentiellement heuristique et adopte une approche de décomposition s'inspirant de la méthodologie développée par Crainic (1982) dans un contexte différent. Les méthodes de solution décrites dans cette thèse ont été testées avec succès sur des données réelles provenant de la division des Messageries du C.N. Les principaux résultats obtenus y sont présentés et analysés.

Nous avons également effectué de nombreuses analyses de sensibilité afin de vérifier le comportement de notre modèle et de mieux comprendre les relations de compromis entre les coûts d'opération et les niveaux de service. Enfin, on présente également les résultats d'analyses de scénarios visant à démontrer la versatilité et l'utilité du modèle proposé dans cette thèse pour répondre à des besoins spécifiques des gestionnaires.

INTRODUCTION

Le transport des marchandises occupe une place importante dans l'économie nord-américaine. Taff (1978) estime en effet que la facture totale pour le transport des marchandises aux Etats-Unis s'élève à un peu moins de 10% du produit national brut. Néanmoins, l'importance relative des coûts de transport varie énormément selon l'industrie ou le type de produit, passant d'environ 1% à 13% du prix à la production pour les produits fabriqués au Canada en 1974, (Skoulas, 1981). Parmi les modes utilisés pour le transport des marchandises, le camionnage se distingue nettement par l'importance de sa part relative des recettes totales qui était de l'ordre de 69% au Canada en 1974, (Skoulas, 1981) et de 80% aux Etats-Unis en 1977 (Taff, 1978), alors que celle du rail était respectivement de 16% et 13% pour le Canada et les Etats-Unis. Quant au Québec, on estime, dans un document préparé par le Ministère des Transports (1982), que les recettes totales de l'industrie du transport routier des marchandises étaient d'environ 4 milliards de dollars, en 1982.

Malgré l'importance de l'industrie du camionnage dans notre économie et en dépit du fait que cette industrie a connu de sérieuses difficultés financières attribuables, du moins partiellement, à un ralentissement dans l'augmentation de sa productivité durant ces dernières années, relativement peu de recherches ont été consacrées jusqu'à présent à l'amélioration de la gestion des opérations dans les entreprises de transport routier des marchandises. Peu de modèles d'offre existent dans le contexte du transport des marchandises afin de représenter fidèlement les comporte-

ments de ce secteur. Pourtant, cette industrie est en pleine mutation et nécessite beaucoup de recherche et d'étude pour en comprendre et en guider l'évolution.

Cette opinion rejoint les conclusions du groupe de travail mandaté par le Ministère des Transports du Québec pour préparer un rapport de conjoncture sur l'état de la recherche et du développement en transport (R-DT). Dans ce rapport, rendu public au début de 1983 et intitulé "Les voies de l'avenir", les auteurs recommandent que soit privilégié, entre autres secteurs de R-DT, le développement des méthodes et outils de planification des systèmes de transport routier, de distribution physique des marchandises et de gestion de l'offre. Notre thèse s'inscrit dans ce contexte et revêt une importance particulière en ce sens qu'elle peut contribuer à améliorer la gestion des entreprises de transport de marchandises au Canada. D'ailleurs, les résultats obtenus en expérimentant le modèle de planification globale proposé dans cette thèse nous laissent déjà entrevoir des économies importantes dans les coûts d'opération des transporteurs et des améliorations sensibles dans les niveaux de service offerts aux expéditeurs.

Le problème spécifique faisant l'objet de cette thèse est celui de la planification globale des opérations de transport routier des marchandises en lots brisés. En bref, il s'agit de déterminer les itinéraires que devront emprunter les marchandises expédiées ainsi que les fréquences de service s'y rattachant, pour une période de planification donnée. Pour résoudre ce problème de façon systémique, c'est-à-dire en tenant compte à la fois des coûts d'opération et des niveaux de service, un nouveau modèle d'optimisation est proposé. Ce modèle ne cherche pas à évaluer les opéra-

tions quotidiennes des transporteurs mais vise plutôt un niveau d'aggrégation plus élevé en s'insérant au processus de planification tactique (à court ou à moyen terme) d'ajustement de l'offre à la demande de transport.

Examinons maintenant, de façon plus détaillée, le contenu de cette thèse. Tout d'abord, le chapitre 1 nous propose un tour d'horizon de l'industrie du camionnage au Canada. Après avoir étudié l'environnement particulier dans lequel évoluent les entreprises de transport routier des marchandises, on se penche ensuite, tout particulièrement, sur les problèmes et méthodes de gestion caractérisant ces entreprises et on termine en démontrant la nécessité d'aborder les problèmes de conception et de gestion des opérations de transport des marchandises avec une approche globale.

Le chapitre 2 définit le problème spécifique faisant l'objet de cette thèse et dresse un état des connaissances actuelles sur ce sujet. Au chapitre 3, on propose une nouvelle formulation pour un modèle normatif de planification globale dans les entreprises de transport routier des marchandises en lots brisés. Ce modèle a la forme générale d'un modèle d'optimisation non-linéaire mixte et fait appel à des notions de services et d'itinéraires utilisées dans un autre contexte, celui du transport ferroviaire des marchandises (Crainic, 1982). Enfin, une nouvelle approche est proposée pour résoudre l'épineux problème du retour à vide des remorques; problème engendré par le déséquilibre entre le nombre de remorques expédiées et celles reçues à chaque terminus.

Le chapitre 4 présente les méthodes utilisées pour résoudre le problème tel que formulé au chapitre précédent. L'algorithme proposé s'inspire

de la méthodologie développée par Crainic (1982) et adopte une approche de décomposition tenant compte de la structure particulière du modèle et de la grande taille du problème. Cet algorithme est ensuite expérimenté à l'aide de données réelles provenant de la division des Messageries du Canadien National. Le chapitre se termine enfin par un examen de la validité du modèle suivi d'une brève analyse des résultats obtenus.

Au chapitre 5, nous présentons les résultats de nombreuses analyses de sensibilité servant à illustrer l'utilité et la versatilité du modèle proposé dans cette thèse, comme outil d'aide à la prise de décision. Finalement, nous concluons cette thèse en décrivant le travail qu'il reste à faire pour faciliter et généraliser l'utilisation de notre modèle comme outil d'aide à la prise de décision et en suggérant quelques avenues de recherche connexes.

CHAPITRE 1

Le transport routier des marchandises

Ce chapitre analyse la situation de l'industrie du camionnage au Canada en insistant davantage sur 1) l'environnement particulier (e.g. réglementation, concurrence) dans lequel évoluent les entreprises de transport routier des marchandises, 2) leurs modes d'opérations, 3) leurs méthodes de gestion et, enfin, 4) la nécessité d'aborder les problèmes de compromis entre les coûts d'opérations et le service avec une approche globale.

1.1 L'environnement particulier

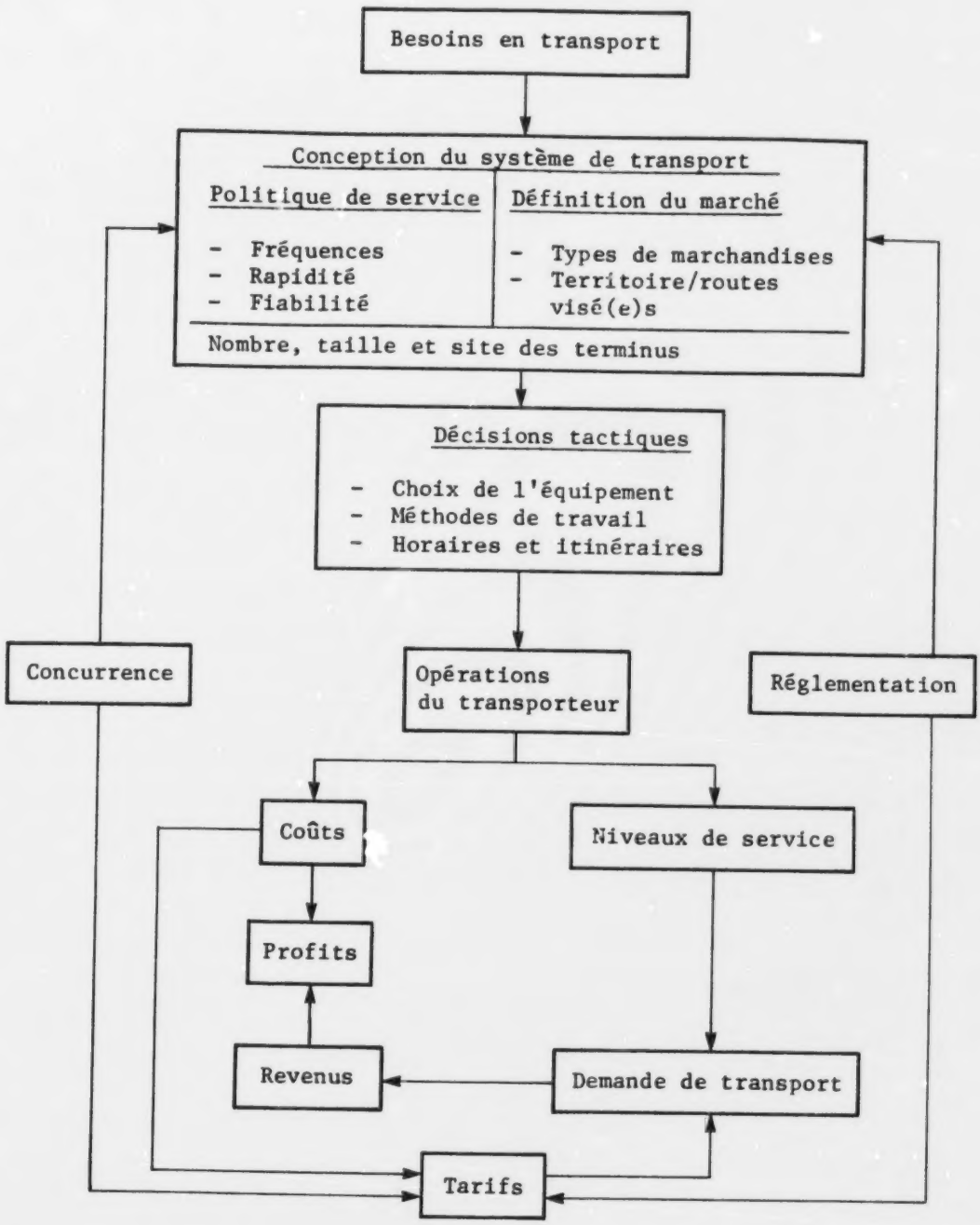
On prétend souvent que la situation financière dans laquelle se trouve l'industrie du transport routier des marchandises est due à la fois à la conjoncture économique et à la qualité de la gestion des entreprises de camionnage. Dans cette section, on cherche à mieux comprendre l'environnement particulier dans lequel évoluent les entreprises de transport.

1.1.1 Les facteurs régissant une entreprise de transport

La figure I, adaptée de l'article de Roy (1982), illustre les facteurs dans l'environnement régissant la conception et les opérations d'une entreprise de transport routier de marchandises. Au niveau de la conception d'un système de transport, on devra nécessairement tenir compte des

FIGURE I

L'environnement particulier d'une entreprise de transport



besoins en transport des clients potentiels (i.e. expéditeurs et/ou destinataires). Ces besoins varient en fonction, 1) du type de marchandises à transporter, de leur poids, volume et caractéristiques particulières (e.g. matières dangereuses), 2) du service requis (e.g. heures de ramassage, temps de transit et de livraison) et, 3) des points d'origine et de destination de la marchandise.

La conception d'un système de transport est également influencée par les organismes de réglementation, au niveau de l'émission des permis de transport, et par les entreprises concurrentes offrant déjà des services de transport dans un marché donné. (Ces deux facteurs sont tellement importants qu'ils feront l'objet de discussions plus détaillées dans les prochaines sections.) La mise en place d'un réseau de terminus est une autre décision de nature stratégique reliée à la conception du système de transport. Ainsi, un transporteur qui, par exemple, voudrait offrir des services de transport de marchandises en lots brisés (i.e. des chargements incomplets pesant généralement moins de 10 000 lbs) devra organiser un réseau de terminus de consolidation où la marchandise ramassée en lots brisés sera consolidée en chargements entiers (ou "truckloads") pour réaliser des économies de transport sur de longues distances. Il importe donc de bien choisir le nombre, la taille et les sites des terminus dans la phase de conception du système de transport.

Si l'on retourne maintenant à la figure I, on observe que les décisions reliées à la conception du système de transport vont, à leur tour, influencer les choix effectués au niveau tactique; i.e. choix des équipe-

ments de transport et de manutention, des méthodes de travail, des itinéraires et des horaires. Ainsi, les niveaux de service définis dans la politique de service de l'entreprise (e.g. un service de 24 heures, 80% du temps, entre les points A et B) auront un impact direct sur les méthodes de manutention utilisées dans les terminus, les horaires de départ et d'arrivée des remorques ainsi que leurs itinéraires. De même, le type de marchandise sollicitée influencera les méthodes et l'équipement de manutention qui varieront selon le poids moyen des expéditions. C'est pourquoi on assiste à une spécialisation des transporteurs dans différentes catégories: 1) chargements complets (ou charges entières ou "truckloads") correspondant au transport de remorques pleines, 2) chargements incomplets (ou lots brisés ou "less-than-truckload") correspondant au transport de lots pesant quelques centaines de livres en moyenne, et 3) services de messageries correspondant au transport de petits colis dont le poids est inférieur à 50 lbs, en général. Le tableau I fait ressortir les différences entre chacune de ces catégories en comparant les revenus moyens par tonne pour un échantillon de transporteurs américains de chargements complets et incomplets et pour la compagnie United Parcel Service (U.P.S.) spécialisée dans le transport de petits colis.

La conception du système de transport ainsi que les décisions tactiques qui en découlent déterminent un ensemble de contraintes qui devront être respectées au niveau des opérations quotidiennes du transporteur. En simplifiant quelque peu la réalité, on peut représenter les extrants du système de transport comme 1) des niveaux de service offerts aux expéditeurs/destinataires, et 2) des coûts résultant de décisions stratégiques et tac-

TABLEAU I

Revenu par tonne
Groupe de 477 transporteurs des
Etats-Unis et la Compagnie United Parcel Service [1]

Type de transporteur	Revenu par tonne			
	1973	1974	1975	1976
Charges entières	24.03	27.15	28.46	29.56
Lots brisés	80.69	81.13	89.58	98.63
Petits colis (U.P.S.)	290.62	300.89	310.73	351.41
Total	35.98	46.79	51.99	54.38

1 Source : Moritz (1978).

tiques (coûts relativement fixes) et de décisions opérationnelles (coûts relativement variables).

Les niveaux de service offerts par un transporteur sont un facteur déterminant dans le processus équilibrant l'offre et la demande de transport de marchandises. En effet, les expéditeurs et/ou destinataires seront influencés par le genre de service qu'ils ont obtenu d'un transporteur par le passé quand viendra le temps de choisir le mode de transport et/ou le transporteur à qui ils confieront leurs besoins de transport à l'avenir. D'un autre côté, les entreprises de transport devront apporter des ajuste-

ments périodiques à leur offre de services en fonction des variations importantes dans le volume de marchandises qu'elles obtiennent des différents segments de marché desservis. Bref, les niveaux de service offerts par un transporteur affectent la demande de transport selon un processus itératif entraînant des besoins d'ajustements périodiques de la part des expéditeurs et des entreprises de transport.

Les tarifs de transport sont les prix que chargent les transporteurs pour leurs services. Les tarifs sont donc établis en tenant compte des coûts occasionnés par les transporteurs et doivent généralement être approuvés par des organismes gouvernementaux dans les provinces où l'industrie du camionnage est réglementée. Dans les prochaines sections, nous allons étudier en détail les impacts de la réglementation et de la concurrence sur la conception d'un système de transport et sur la détermination des tarifs de transport. Nous allons ensuite porter notre attention sur les coûts de transport en discutant certaines caractéristiques particulièrement importantes dans l'industrie du camionnage.

1.1.2 La réglementation et son influence sur les marchés et les tarifs

Au siècle dernier, les compagnies de chemin de fer détenaient le monopole du transport des marchandises aux Etats-Unis et au Canada. Cette situation favorisait les expéditeurs les plus importants localisés près des grands centres urbains. La libre concurrence et l'intérêt public étant menacés, les gouvernements eurent recours à la réglementation en forçant les chemins de fer à fournir des services de transport à tous les expédi-

teurs, quelle que soit leur localisation ou leur taille, et ce, à des taux non discriminatoires. Avec l'expansion du transport routier, maritime et aérien, la réglementation gouvernementale s'étendit à toute l'industrie du transport (Lapierre, 1977; Mayrand, 1977; Haritos et Elliott, 1983).

Au Canada, c'est la Commission canadienne des transports qui réglemente le transport interprovincial alors que les Commissions provinciales ont juridiction sur le transport routier de passagers et marchandises à l'intérieur des provinces (Mayrand, 1977). Cette juridiction partagée signifie qu'un transporteur désirant étendre son service à l'extérieur de sa province doit s'adresser à chacun des organismes provinciaux où il veut opérer afin d'obtenir un permis.

Tel qu'indiqué à la figure I, les organismes de réglementation influencent les entreprises de transport en contrôlant l'émission des permis de transport et la fixation des tarifs. Il existe plusieurs catégories de permis: transport général ou spécialisé, local ou sur longue distance, régulier ou irrégulier, etc. Ainsi, un transporteur désirant offrir ou étendre ses services sur une nouvelle route doit démontrer à la commission compétente qu'il existe un besoin réel de transport sur cette route et que ce besoin n'est pas satisfait de façon adéquate par aucune autre entreprise (Lapierre, 1977). Une telle réglementation a été justifiée pour éviter, entre autre, une concurrence destructrice dans l'industrie du camionnage (Mayrand, 1977). En effet, si un trop grand nombre de transporteurs se partagent le transport de marchandises entre deux points, ils n'obtien-

dront pas un volume suffisant pour rentabiliser leurs opérations et le service offert en souffrira. Cette situation entraînera la disparition de plusieurs entreprises et le contrôle du marché par un nombre restreint de transporteurs; ce qui va à l'encontre de l'intérêt public. Ajoutons, enfin, que l'obtention d'un permis impose à son détenteur l'obligation de donner le service autorisé sous peine d'annulation du permis.

Quant aux tarifs, ils doivent être déposés pour publication auprès des Commissions de transport impliquées. Rappelons que les taux ou tarifs de transport sont basés sur les coûts occasionnés par le transport des marchandises et varient selon plusieurs facteurs tels les caractéristiques de la marchandise (poids, densité, valeur et risque) et la distance parcourue. De façon générale, les taux doivent être établis en tenant compte de l'intérêt des transporteurs, des expéditeurs et du public. C'est aux différentes commissions de transport que revient la responsabilité d'établir un consensus entre ces intérêts, souvent divergents, et d'approuver les tarifs (Haritos et Elliott, 1983).

Toute la question des tarifs est évidemment fort complexe et c'est pourquoi les transporteurs ont ressenti le besoin de se regrouper en association afin d'établir des taux en commun et de les déposer auprès des commissions de transport pour fins de publication. Au Québec, par exemple, c'est le Bureau des tarifs du Québec Inc. qui joue ce rôle pour la majorité des transporteurs de marchandises générales sur longues distances.

On ne peut pas terminer cette section sans parler du mouvement de dénonciation de la réglementation économique du transport qui a pris

beaucoup d'ampleur aux Etats-Unis, vers le milieu des années 1970. En effet, un nombre important de gens influents ont proposé de "déréglementer" l'industrie du transport routier de marchandises en alléguant que la réglementation nuit à la libre entreprise et contribue à l'augmentation des prix dans l'industrie du transport (Lapierre, 1977). Malgré l'opposition farouche de nombreux représentants de l'industrie du camionnage, on a assisté depuis quelque temps déjà à un assouplissement progressif de la réglementation du transport routier aux Etats-Unis et ce mouvement a culminé avec le "Motor Carrier Act" de 1980 qui a essentiellement mis fin à la réglementation dans l'industrie du camionnage. Au Canada, cependant, on semble moins empressé de mettre fin à la réglementation même si certaines provinces, comme le Québec et l'Ontario, ont déjà apporté des assouplissements à leur réglementation (Alary, 1983 et Koroluk, 1983).

1.1.3 La concurrence et l'importance relative des tarifs et des niveaux de service

Comme on vient de le voir, l'offre de service ainsi que les tarifs de transport sont réglementés sur un marché donné (origine-destination de la marchandise) par des organismes gouvernementaux. On pourrait donc négliger l'influence de la concurrence sur ces mêmes marchés... mais ce serait une grave erreur. En effet, on peut affirmer que, malgré la réglementation, le secteur du transport routier est très concurrentiel. Cette concurrence provient de deux sources principales; la concurrence intramodale et la concurrence intermodale. La concurrence intramodale est celle que se livrent des entreprises offrant un même mode de transport

sur un marché donné tandis que la concurrence intermodale provient de transporteurs opérant dans des modes différents, mais sur les mêmes marchés (Lapierre, 1977).

Même si la concurrence intramodale est limitée par la réglementation gouvernementale (à travers l'émission des permis), on observe parfois une concurrence déloyale de la part de certains transporteurs opérant sans permis dans un marché donné. On assiste aussi à une concurrence sur les prix qui risque souvent de devenir destructrice malgré le fait que de telles pratiques soient illégales. Il semblerait que ce problème soit particulièrement aigu au Québec où plusieurs porte-parole de l'industrie [1] condamnent le manque de contrôle exercé par la Commission des transports et considèrent que les amendes sont trop basses pour décourager les contrevenants.

La concurrence intermodale peut prendre plusieurs formes: chemins de fer, conteneur, service rail-route ou "piggyback" en plus du transport maritime et aérien. Le camionnage est avantageux lorsque:

1) la rapidité, la fréquence et la fiabilité du service sont importantes;

2) les distances sont plutôt courtes;

3) un service porte à porte est requis, et

4) la valeur de la marchandise est élevée.

---

1 Voir, entre autres, le mémoire du Bureau des tarifs du Québec (1977), le texte de J.M. Perron (1979) et celui de J. Alary (1981).

On aura surtout recours au rail lorsque:

1) d'importants volumes de marchandises sont expédiés sur de longues distances;

2) les risques de dommages et de pertes sont minimes;

3) le service porte à porte n'est pas nécessaire, et

4) la rapidité et la fréquence du service sont moins importantes.

(Lapierre, 1977; Bowersox, 1978).

Puisque le transport par rail est peu coûteux sur de longues distances et que le camionnage assure un bon service, alors la combinaison des deux modes de transport, i.e. le transport de remorques de livraison par chemin de fer ("Trailer on Flat Car" ou "T.O.F.C.") constitue un compromis efficace qui allie les avantages des deux moyens de transport routier traditionnels.

Il existe également d'autres formes de concurrence dans le transport routier. Jusqu'à présent, on a parlé de transporteurs publics, c'est-à-dire d'entreprises de transport offrant leurs services à tous les expéditeurs d'un marché donné, mais il existe aussi un segment important qui est privé, soit environ la moitié du marché du camionnage (Lapierre, 1977; Gosselin, 1982). C'est le cas des expéditeurs qui effectuent eux-mêmes le transport de leurs propres marchandises et dont la principale activité est autre que celle du transport. Ces derniers possèdent plusieurs avantages sur les camionneurs publics dont ceux rattachés au fait que le camionnage privé n'est pas réglementé. Enfin, plusieurs représentants de l'industrie du camionnage s'accordent à dire que la location à court terme de véhicules

de transport peut parfois devenir une autre forme de concurrence déloyale pour le camionnage public en ce sens que la location de camions peut servir à camoufler du transport illégal.

Après ce bref tour d'horizon des différentes formes légales et illégales de concurrence dans le transport routier, doit-on conclure que les transporteurs publics doivent se livrer une lutte principalement axée sur les prix, au détriment même du service offert aux expéditeurs? Eh bien non, car toutes les enquêtes auprès des expéditeurs tant canadiens qu'étrangers confirment l'importance primordiale du service dans le choix du mode de transport et également du transporteur utilisé. Les tableaux II, III et IV démontrent clairement qu'une entreprise de transport qui peut offrir un service rapide et fiable sur un marché donné aura un avantage marqué sur ses concurrents.

Même si les enquêtes auprès des expéditeurs démontrent la prépondérance du service comme critère de sélection des transporteurs, il n'en demeure pas moins que les tarifs ont tendance à être plus importants que le service en période de récession économique. De plus, tous les produits ne doivent pas nécessairement être livrés à destination avec le même degré d'empressement. Il existe donc des segments du marché pour lesquels les tarifs prennent plus d'importance que la rapidité et même la fiabilité du service.

On peut également supposer que l'importance relative du service et des tarifs sera perçue différemment par les transporteurs de divers modes de transport. Ainsi, le tableau V nous fait connaître la perception

TABLEAU II

L'importance relative des différents facteurs dans le choix d'un transporteur au Canada[1]

Facteurs	Rang sur une base nationale			
	1976	1973	1970	1968
- Ponctualité	1	2	3	2
- Temps pris pour le transport	2	1	1	1
- Tarifs	3	3	2	3
- Pertes et dommages	4	8	9	9
- Service "porte-à-porte"	5	4	6	6
- Repérage des expéditions	6	5	4	4
- Fréquence du service	7	6	5	5
- Disponibilité d'équipement standard	8	7	8	7
- Règlement des réclamations	9	9	7	8
- Service d'information	10	10	10	10

1 Source : The Research Bureau (1976).

TABLEAU III

Les critères de sélection utilisés pour
évaluer les entreprises de camionnage aux Etats-Unis[1]

Rang	Critères de sélection	Importance (Moyenne obtenue sur 100)
1.	Ponctualité	92.4
2.	Tarifs	79.8
3.	Temps pris pour le transport	79.1
4.	Etendue du réseau de distribution	73.9
5.	Fréquence du service	72.1
6.	Pertes et dommages	69.2
7.	Disponibilité d'équipement	65.6
8.	Service "porte-à-porte"	61.9
9.	Repérage des expéditions	61.8
10.	Règlement des réclamations	60.8

1 Source : Stock, J.R. et B.J. Lalonde (1978).

TABLEAU IV

Les facteurs déterminant le choix des transporteurs et du mode de transport utilisés selon une enquête auprès de 351 expéditeurs américains[1]

Rang	Facteurs	Moyenne[2]	Ecart-type
1.	Service rapide et fiable	1.67	0.461
2.	Tarifs	1.81	0.600
3.	Pertes et dommages	2.01	0.745
4.	Influences du marché	2.26	0.865
5.	Niveau des stocks	2.28	0.688
6.	Position concurrentielle	2.28	0.703
7.	Politique de la compagnie	3.65	0.765

1 Source : Mc Ginnis (1980).

2 Accord avec l'importance des facteurs: 1 = fortement en accord, 2 = en accord, 3 = sans opinion, 4 = en désaccord, 5 = fortement en désaccord.

TABLEAU V

L'importance relative des variables de marketing
telle que perçue par différents transporteurs américains[1]

Variables du marketing	Camionnage	Chemins de fer	Transport aérien
Promotion	31	19	32
Prix (tarifs)	19	31	20
Services offerts	35	27	45
Réseau de distribution	15	23	3
Total	100	100	100

1 Source : Lalonde, B.J. et P.A. Zinszer (1976), p. 103.

qu'ont différents transporteurs de marchandises de l'importance relative des quatre variables du marketing: promotion, prix, service et réseau de distribution. On s'aperçoit que les chemins de fer accordent beaucoup plus d'importance aux tarifs que ne le font les entreprises de camionnage et de transport aérien dans leurs stratégies de marketing. De même, ces dernières vont appuyer leurs efforts de marketing sur la qualité des services offerts et sur la promotion de ces services tandis que les chemins de fer vont plutôt insister sur l'étendue de leur réseau de distribution et leurs bas prix pour attirer la clientèle.

En terminant, le tableau VI illustre les différences de perception qu'ont les transporteurs routiers et leurs clients de l'importance relative des mêmes variables de marketing. On constate que les expéditeurs accordent beaucoup plus d'importance aux tarifs et moins d'importance aux efforts de promotion que ne le font les transporteurs routiers.

1.1.4 Quelques particularités des coûts dans l'industrie du camionnage

Avant de terminer cette première section, on doit souligner certaines caractéristiques des coûts propres à l'industrie du camionnage. Ainsi, l'existence d'économies d'échelle dans cette industrie est controversée (Chow, 1978; Boucher, 1980), certains allant même jusqu'à parler de "déséconomies d'échelle". En effet, on observe que les dépenses associées aux terminus augmentent plus vite que les revenus suite à un accroissement du volume; ce qui entraîne une détérioration de la situation financière des entreprises de transport dont la taille passe de petite à moyenne. Cette situation se stabilise cependant lorsque le transporteur atteint un volume important. Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer ce phénomène, dont celle de Wyckoff (1974) qui y voit une conséquence de la difficulté d'adaptation de l'organisation d'une P.M.E. à gestion informelle à un plus grand degré de formalisation lorsque l'augmentation du volume des affaires nécessite une plus grande décentralisation de l'autorité.

Une autre caractéristique de l'industrie du camionnage est que les frais de main-d'oeuvre représentent en général plus de la moitié des coûts d'opération (Lapierre, 1977; Diamond, 1980). Il n'est donc pas surpre-

TABLEAU VI

L'importance relative des variables du marketing
telle que perçue par les transporteurs routiers américains et leurs clients[1]

Variables du marketing	Expéditeurs		Transporteurs routiers
	Lots brisés	Charges entières	
Promotion	10	0	31
Prix (tarifs)	32	39	19
Services offerts	37	43	35
Réseau de distribution	21	18	15
Total	100	100	100

1 Source : Lalonde et Zinszer (1976), p. 130.

nant que les transporteurs attachent beaucoup d'importance au contrôle des coûts de main-d'oeuvre, en particulier, et de tous les coûts en général, car de bons mécanismes de contrôle sont essentiels dans un tel environnement particulier où les marges de profit sont généralement assez minces. Nous reviendrons d'ailleurs sur cette question à la section 1.3 lorsque nous aborderons les méthodes de gestion. En attendant, jetons un coup d'oeil sur les opérations d'un transporteur.

1.2 Les opérations de transport de marchandises

Pour mieux comprendre les opérations de transport de marchandises, on peut se référer à la figure II qui représente le cheminement typique de marchandises en lots brisés tel que décrit dans Wyckoff (1974).

Le cycle débute avec une demande de ramassage qui est rarement connue à l'avance et qui varie, parfois considérablement, d'une journée à l'autre. Cela pose continuellement des problèmes d'allocation et d'utilisation de ressources humaines et matérielles. La demande fluctue également selon les saisons et le type d'expédition. Par exemple, les débuts du printemps et de l'automne sont des périodes de pointe dans l'industrie du vêtement. Cela entraîne donc des problèmes de planification globale du système de transport afin de répondre à ces variations saisonnières de la demande [1].

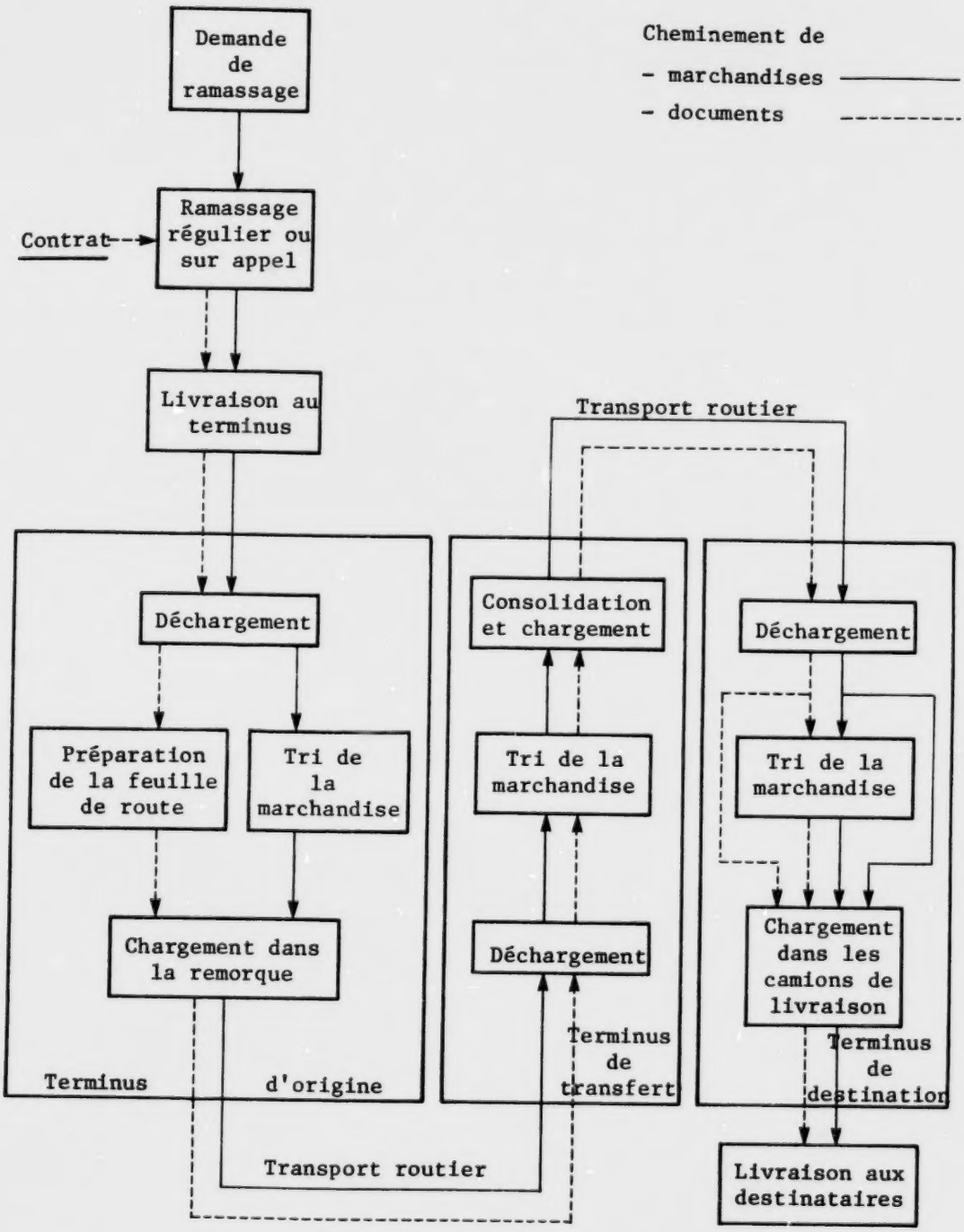
Si la marchandise ramassée est un chargement complet, alors elle sera livrée directement à son destinataire sans aucune autre forme de manutention. Cela est donc plus économique et explique pourquoi les tarifs sont moins élevés par unité de poids dans cette catégorie (voir le tableau I). Si la marchandise ramassée est composée de petits colis (0 à 50 lbs) et qu'elle est destinée à un autre point dans la même ville, alors elle sera habituellement livrée directement sans passer par le terminus. Sinon, la marchandise suivra à peu près le même cheminement que celui des chargements incomplets décrit à la figure II.

---

1 Il s'agit là d'un des problèmes faisant plus spécifiquement l'objet de cette thèse et qui sera abordé au chapitre 2.

FIGURE II

Cheminement typique de marchandises en lots brisés



Certains clients L.T.L. expédient de la marchandise régulièrement, plusieurs fois par semaine. Ils deviennent des clients réguliers où les camions de ramassage vont s'arrêter à tous les jours, sans que le client ait besoin de téléphoner à l'entreprise de transport. Les transporteurs estiment généralement qu'un service régulier de ramassage incite les clients à leur donner plus de marchandises. Il faut cependant tenir compte du coût associé aux arrêts improductifs qui se produisent à chaque fois que l'expéditeur n'a rien à donner au transporteur. Quant aux clients occasionnels ou "sur appel", ils doivent téléphoner au transporteur à chaque fois qu'ils désirent faire ramasser leur marchandise.

C'est l'expéditeur qui prépare habituellement le contrat ou connaissement. Il s'agit d'un document où apparaissent les noms et adresses de l'expéditeur et du destinataire, les termes de l'entente entre les parties en cause, ainsi que les caractéristiques de la marchandise expédiée. Le contrat sert également de reçu pour celui qui envoie la marchandise.

La marchandise ainsi ramassée est ensuite livrée au terminus d'origine où elle est déchargée et vérifiée. On s'assure ainsi de l'exactitude de l'information inscrite sur les contrats: poids, dimensions, nombre de colis par envoi, type de marchandise, etc. Les contrats sont ensuite acheminés vers le bureau de tarification où les tarifs exacts sont déterminés et une feuille de route est préparée. La feuille de route est le document de base indiquant le type de marchandise, son poids, le nombre de morceaux par envoi et le tarif correspondant.

Une fois déchargée et vérifiée, la marchandise est dirigée vers des aires de chargement correspondant à sa destination. Elle est ensuite chargée dans des remorques avec les feuilles de route correspondantes pour le transport intercité. La marchandise locale, destinée à un autre point de la ville d'origine sera triée, codée et ensuite dirigée vers les zones de chargement local pour livraison le lendemain matin.

En route vers sa destination finale, il se peut que la marchandise soit consolidée, c'est-à-dire que des chargements incomplets soient rassemblés en un seul chargement complet afin d'utiliser au maximum l'équipement de transport routier. Cette consolidation peut se faire dans n'importe quel terminus ou encore dans des terminus spécialement conçus à cette fin, dits terminus de consolidation. Dans le pire des cas, la marchandise sera de nouveau déchargée, triée et rechargée au terminus de transfert, mais il se peut aussi qu'elle demeure dans le "nez" de la remorque et que d'autres marchandises y soient ajoutées, ce qui diminue considérablement les coûts de manutention.

Arrivée au terminus de destination, la marchandise sera à nouveau déchargée, vérifiée et ensuite triée, codée et dirigée vers son aire de chargement pour livraison à son destinataire. Il existe bien sûr des variantes à la procédure décrite ci-haut. Ainsi, plusieurs grandes entreprises de transport ont des systèmes informatisés pour contrôler la documentation; ce qui permet, entre autres choses, de faire parvenir, par télécommunication, la liste du contenu des remorques à leur terminus de destination avant que ces dernières n'arrivent. On peut ainsi mieux pla-

nifier la charge de travail des employés du terminus et connaître les volumes de marchandises à livrer le lendemain matin.

1.3 La gestion d'un système de transport

Dans la première partie de ce chapitre, on a vu comment la conception d'un système de transport ainsi que toutes les décisions tactiques et opérationnelles découlant de la gestion d'un tel système de transport déterminaient à la fois les niveaux de service offerts sur les marchés et les coûts d'opération subis par le transporteur (voir la figure I). Quelle que soit la taille de l'entreprise de transport considérée, il est donc essentiel qu'elle exerce un contrôle adéquat de sa performance en termes de coûts et de service. Car tout relâchement dans le contrôle de l'un ou l'autre de ces critères de performance peut entraîner des pertes substantielles, à plus ou moins brève échéance; tout comme un bon contrôle peut assurer un excellent retour sur l'investissement car les dépenses de capital sont relativement faibles dans ce secteur.

Dans les sections suivantes, nous voyons comment les systèmes d'information, les mesures de performance et les systèmes d'aide à la prise de décision peuvent être utilisés par les gestionnaires des entreprises de transport afin de mieux planifier et contrôler leurs opérations.

1.3.1 Les systèmes d'information

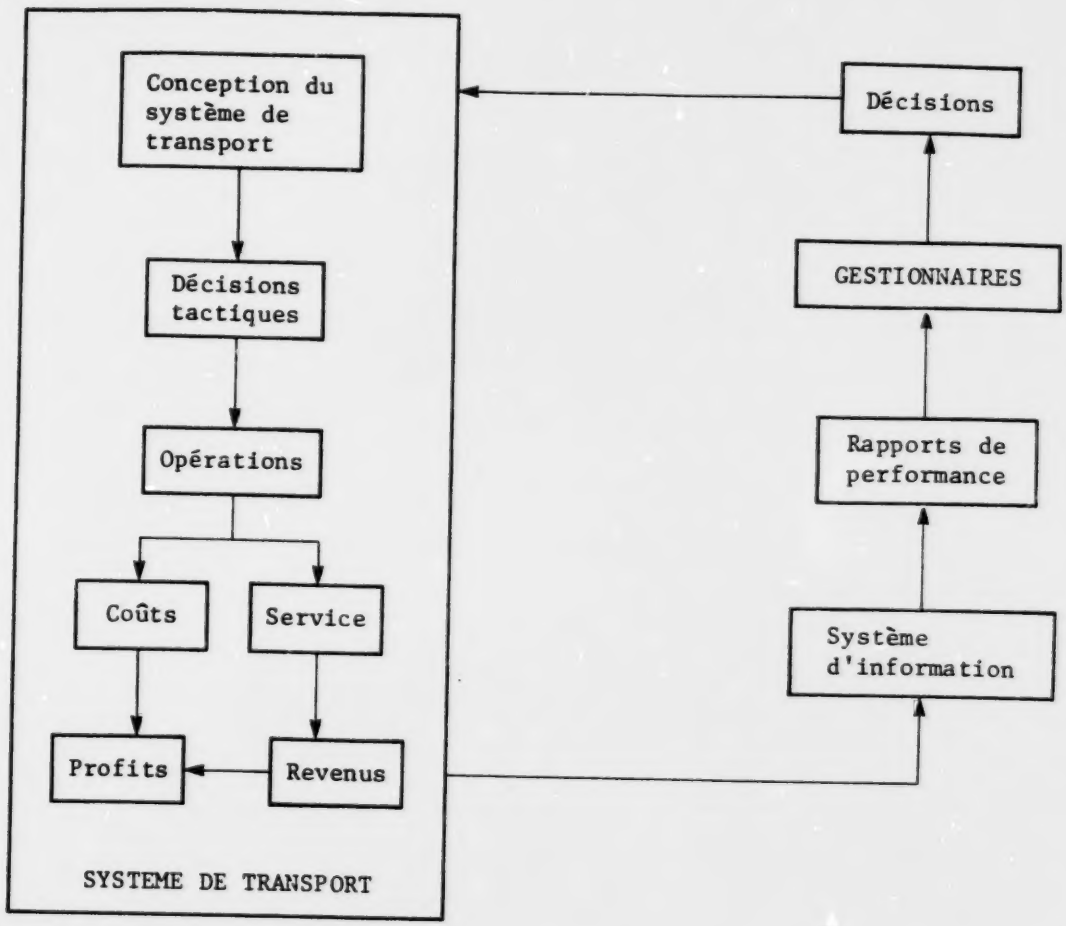
La figure III illustre le processus typique de planification et contrôle d'un système de transport proposé par Roy (1982). On y retrouve une simplification du système de transport (tel qu'illustré à la figure I) dont la performance est mesurée et communiquée aux gestionnaires à l'aide d'un système d'information afin de les aider à prendre de meilleures décisions en vue d'atteindre ou de maintenir les objectifs de l'entreprise.

En utilisant un système d'information efficace, un transporteur devrait être en mesure d'améliorer la profitabilité de son entreprise. Cependant, le nombre et la variété des expéditions transportées par un camionneur de taille moyenne engendrent beaucoup d'interrogations quant à la profitabilité relative de cette marchandise.

Ainsi, par exemple, un transporteur devrait-il préférer un envoi pesant 200 livres, comprenant 3 morceaux et destiné de Montréal à Toronto ou bien un envoi comprenant un seul morceau pesant 200 livres, destiné de Montréal à Vancouver? La réponse à cette question dépend évidemment de notre connaissance, d'une part, des coûts associés à chacun de ces envois qui varient selon le nombre de colis manutentionnés, leur poids, la distance parcourue entre les deux villes, la distance entre les terminus et les lieux de ramassage et de livraison, le nombre et le type de terminus de transfert impliqués, etc. et, d'autre part, des revenus qui eux sont connus et disponibles. Bref, à la limite, chaque expédition entraînera une série de dépenses qui lui seront propres. Il est donc quasiment im-

FIGURE III

La gestion d'un système de transport



possible de mesurer la contribution de chaque expédition aux profits de l'entreprise de transport.

On peut cependant établir des coûts standards pour la plupart des opérations impliquées dans le transport des marchandises d'un point A au point B, tel que discuté à la section précédente, et ainsi capturer l'essence des coûts associés à une expédition type entre deux points en se basant sur ses caractéristiques principales, i.e. le nombre de colis par envoi et leur poids. Il faut ensuite procéder à l'allocation des coûts fixes et, enfin, réduire le tout des revenus correspondants. Ce genre d'analyse peut être faite pour chaque type d'expédition et ainsi produire des rapports de profitabilité par catégorie de poids, par terminus, par segments de route (origine, destination) ou pour tout le système (Schiff, 1972).

Pour obtenir ces résultats, l'utilisation de l'ordinateur est nécessaire et occasionne des déboursés considérables qui limitent ce type d'approche aux entreprises dont la taille et la complexité des opérations la justifient. Dans la dernière décennie, la plupart des grands transporteurs américains et canadiens ont adopté ce genre de système d'information et certains (e.g. Ryder Truck Lines Inc., 1978) y ont même ajouté tout un programme de mesures incitatives pour leurs gestionnaires, basé sur leur performance telle que mesurée par le système d'information.

Cependant, il ne faut pas croire que toutes les entreprises de transport ont atteint ce degré de sophistication dans leur système d'information. Ainsi, plusieurs transporteurs doivent se contenter de contrô-

les budgétaires classiques, de rapports de productivité remplis manuellement ou d'études fournies par différents organismes externes comme systèmes d'information (Ministère des Transports du Québec, 1983). Il n'en demeure pas moins qu'au fur et à mesure que l'entreprise de transport progresse dans le temps et élargit son champ d'action, son propriétaire devra s'adapter progressivement à une organisation qui deviendra de plus en plus formelle. Et une façon de mesurer ce degré de formalisme organisationnel, c'est justement d'évaluer la qualité du système d'information mis en place pour, en quelque sorte, compenser pour l'éloignement progressif du propriétaire du feu de l'action. Wyckoff (1974) considère d'ailleurs que ce passage à une organisation plus formelle à l'aide de systèmes d'information plus sophistiqués est une condition essentielle pour que l'entreprise de transport franchisse avec succès cette étape difficile qu'est la croissance.

1.3.2 Les mesures de performance

Si tous les transporteurs n'ont pas les moyens de s'offrir des systèmes d'information sophistiqués comme ceux décrits à la section précédente, la plupart d'entre eux vont quand même utiliser des indicateurs de performance afin de mesurer l'efficacité de leur système en termes de:

1) revenus et dépenses;

2) service;

3) productivité.

Le contrôle des revenus et dépenses s'effectue, en grande partie, par le contrôle budgétaire. Quant au service, on pourra utiliser différentes mesures pour le contrôler. En voici quelques-unes:

- le pourcentage de demandes de ramassage manquées
- le pourcentage d'envois arrivés à destination dans les temps requis pour chaque segment de route important
- le nombre d'expéditions non livrées "x" jours après leur arrivée à un terminus.

Les indicateurs de productivité sont extrêmement importants dans le secteur des transports. Dans une étude effectuée pour le compte du National Council of Physical Distribution Management, A.T. Kearney Inc. (1978) va même jusqu'à prévoir des économies allant de 10% à 20% des coûts de distribution grâce à des programmes visant à améliorer la productivité. De plus, Wyckoff et Maister (1977) rapportent que si la productivité s'est améliorée récemment, dans le transport intercité, il n'en est pas de même pour la productivité dans les terminus qui, elle, s'est détériorée et il semblerait que cette situation soit encore pire dans les grands terminus. Il est donc nécessaire d'explorer plus à fond ce secteur de la productivité.

Habituellement, un programme d'amélioration de la productivité se déroulera en trois phases distinctes. Tout d'abord, on procédera aux différentes mesures de la productivité; on veillera ensuite à communiquer ces résultats afin d'éveiller l'intérêt des gens vis-à-vis la phase finale où l'on met en oeuvre les actions visant à améliorer la productivité.

Mais, auparavant, on doit définir certains termes couramment employés comme indicateurs, i.e. productivité, utilisation et performance (A.T. Kearney Inc., 1978).

1. Productivité

C'est une mesure de la production réelle par rapport à la quantité de ressources utilisées.

Exemples: - le nombre d'expéditions ramassées par heure-homme
- le nombre de milles parcourus par dollar d'essence.

2. Utilisation

C'est une mesure de la capacité utilisée par rapport à la capacité disponible.

Exemples: - % du cubage utilisé dans un camion ou une remorque
- le nombre d'heures-hommes utilisés / le nombre total d'heures-hommes disponibles.

3. Performance

C'est une mesure de la production réelle par rapport à la production standard (ou encore le nombre d'heures de travail "méritées" par rapport au nombre d'heures travaillées).

Exemples: - coût actuel de main-d'oeuvre / coût standard de main-d'oeuvre
- le nombre d'arrêts à l'heure / le nombre standard d'arrêts à l'heure.

On retrouve de nombreux autres exemples des indicateurs de performance utilisés dans chacun des secteurs d'opération en transport, (i.e. transport intercité, flotte de cueillette et livraison, manutention en entrepôt et travail de bureau) dans l'ouvrage de A.T. Kearney Inc. (1978). On retrouvera également plusieurs suggestions pour améliorer la productivité dans les systèmes de distribution physique et de transport dans Wyckoff (1974), Flannery (1980) et Roy et Ravacley (1982).

1.3.3 Les systèmes d'aide à la prise de décision

Les systèmes d'aide à la prise de décision ou "Decision Support Systems" sont en pleine expansion depuis quelques années, et ce, dans plusieurs secteurs dont celui de la distribution physique. On parle de "Management Support Systems" et de son principal promoteur, Geoffrion (1979). Parmi les autres références initiales sur le sujet, on retrouve Gavish (1979), Geoffrion et Powers (1979) et, en marketing, Little (1978).

Selon Geoffrion (1979), un système d'aide à la prise de décision se compose des éléments suivants:

1) un fichier de données écrit sous une forme pouvant être transmise à l'ordinateur;

2) un modèle qui est une description du système réel étudié et des relations par lesquelles on peut influencer sa performance;

3) un programme d'ordinateur permettant de résoudre le modèle à l'aide de différents commandements; e.g. simulation, optimisation;

4) des moyens de communication ou d'interface entre les éléments précédents et le monde du gestionnaire.

Tous ces éléments doivent être intégrés dans un ensemble unifié et organisé afin d'assister le gestionnaire dans sa prise de décision. Cela peut sembler assez théorique et très ambitieux mais, déjà en 1979, Geoffrion rapportait une bonne dizaine d'applications réussies de ce genre d'approche dans la littérature scientifique, dont plusieurs ont paru dans la revue "Interface" (Geoffrion, 1979).

On doit également distinguer ces systèmes d'aide à la prise de décision (D.S.S.) des systèmes d'information pour la gestion (M.I.S.). Ces derniers se composent habituellement de banques de données et produisent des rapports de performance afin de répondre aux besoins d'information des gestionnaires. Mais ils ne renferment pas normalement de modèles et de logiciels permettant au gestionnaire d'évaluer différentes alternatives de solution et même de trouver celle qui optimise ses objectifs. C'est une différence fondamentale qui fait du système d'aide à la prise de décision un outil beaucoup plus sophistiqué et utile mais également plus complexe et difficile à élaborer que le système d'information.

Si l'on retourne maintenant à la gestion d'un système de transport telle qu'illustrée à la figure III, on s'aperçoit qu'il s'agit d'une gestion appuyée sur un système d'information produisant des rapports de performance à l'aide desquels le gestionnaire prend des décisions afin d'améliorer la performance de son système. C'est un processus itératif de gestion par lequel le gestionnaire est continuellement en train de réagir à

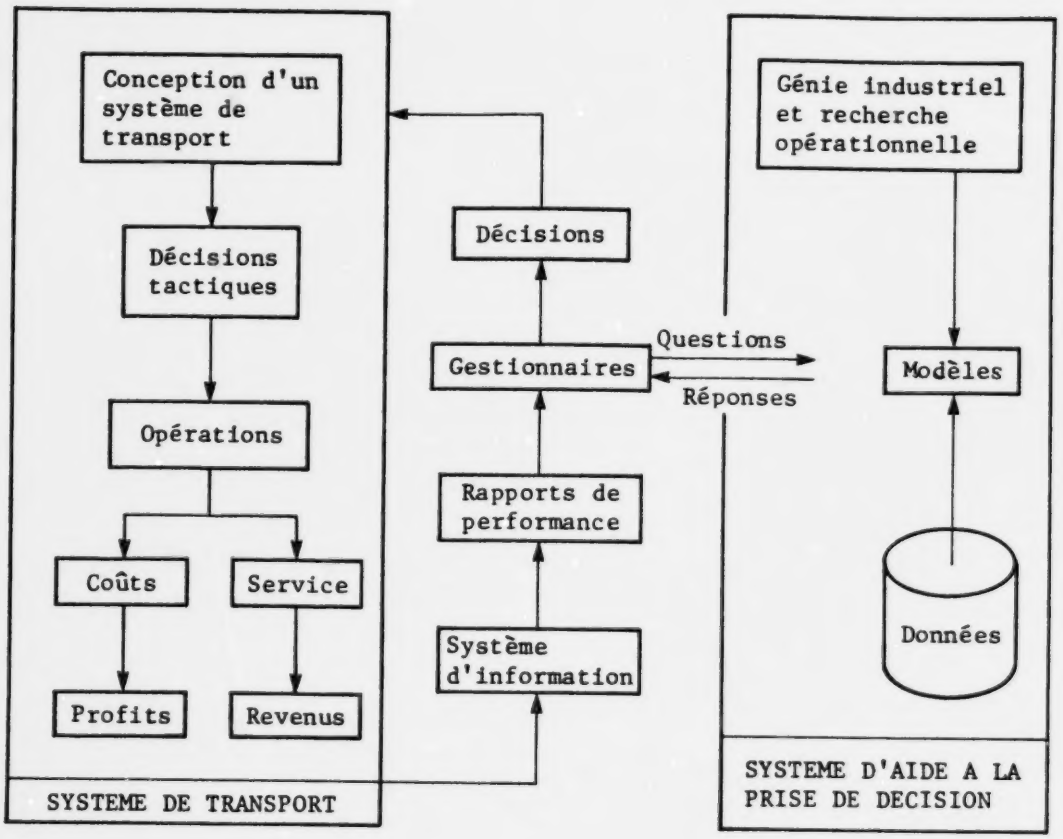
l'information reçue en prenant des décisions dont les résultats ne seront connus qu'après un certain laps de temps.

On peut compléter le système décrit à la figure III en y ajoutant un système d'aide à la prise de décision tel qu'illustré à la figure IV. La principale caractéristique de ce nouveau système de gestion, c'est que le gestionnaire peut maintenant interroger le système d'aide à la prise de décision afin d'évaluer différentes alternatives de solutions à apporter aux problèmes identifiés grâce aux rapports de performance (fonction de simulation) ou bien encore de trouver la meilleure solution possible à un problème particulier (fonction d'optimisation). Bref, il s'agit d'intégrer toutes les activités de support à la prise de décision comme le génie industriel, la recherche opérationnelle et les systèmes d'information en un système organisé afin de répondre rapidement aux questions du management. Des applications de ce concept à l'industrie du camionnage commencent à se développer, e.g. Barker et al. (1981).

En fait, ce qu'on cherche à faire avec un système d'aide à la prise de décision, c'est fournir au gestionnaire un assistant possédant une capacité imposante de mémoire et de calcul avec une connaissance suffisante des rouages du système de transport et une logique à toute épreuve. Il ne s'agit pas d'un super-robot mais plutôt d'un groupe de personnes assisté d'un ordinateur dont la responsabilité est d'aider le gestionnaire dans sa prise de décision et non pas de se substituer à lui.

FIGURE IV

La gestion d'un système de transport appuyée
d'un système d'aide à la prise de décision



1.4 La nécessité d'une approche globale aux problèmes de transport

S'il est un domaine où il y a danger de sous-optimisation, c'est bien celui du transport. En effet, il faut absolument intégrer les opérations et le marketing dans un plan d'ensemble si l'on veut éviter la poursuite d'objectifs divergents. Ainsi, on sait que les gestionnaires des opérations de transport ont traditionnellement cherché à minimiser leurs coûts alors que les responsables des ventes adoptaient des mesures afin de maximiser les revenus de l'entreprise. La poursuite de ces deux objectifs, fort louables en soi, a cependant entraîné des situations désastreuses chez certaines entreprises de transport (Roy et Ravacley, 1982). En effet, la minimisation des coûts de transport passe souvent par une détérioration du service qui, comme on l'a vu précédemment, est un facteur déterminant dans le choix des modes de transport et des transporteurs eux-mêmes. La réduction des coûts devrait donc être sujette au maintien d'un niveau acceptable de service. D'un autre côté, la recherche de revenus additionnels risque d'amener les vendeurs à solliciter des expéditions entraînant des coûts d'opération supérieurs aux revenus obtenus, ce qui à la longue vient miner les efforts de l'ensemble de l'entreprise.

La situation décrite ci-haut provient bien souvent de la faiblesse du système d'évaluation des cadres dans les entreprises de transport (Picard, 1980). En effet, un responsable des opérations dont le rendement est évalué en fonction de ses coûts d'opération sera porté à négliger le service afin d'accroître la productivité de son opération. De la même façon, un responsable des ventes évalué uniquement en fonction du revenu

qu'il attire sera fort peu préoccupé par les frais d'opération additionnels qu'entraînent les expéditions supplémentaires qu'il réussit à décrocher. Un système d'évaluation global axé sur des centres de profit peut améliorer le rendement de l'entreprise dans son ensemble, en rendant les responsables des opérations et des ventes conscients de leur interdépendance et de la réciprocité de leurs objectifs. Néanmoins, il ne sera pas facile pour un transporteur de gérer son entreprise sur la base des centres de profit à moins qu'il ne dispose des ressources suffisantes pour se doter d'un système d'information sophistiqué comme ceux dont on a discuté plus tôt.

S'il est vrai que les différentes fonctions d'une entreprise de transport (e.g. marketing et opérations) doivent être intégrées, il est également important d'évaluer les problèmes d'opération dans le cadre global du système de transport étudié. Ainsi, si l'on se réfère à la figure II, on s'aperçoit que chaque opération, du ramassage à la livraison, est un maillon d'une chaîne qui doit être bien intégré à sa place. Si une opération de ce cycle des marchandises est défectueuse, alors on risque d'avoir un goulot d'étranglement qui va perturber tout le système en entier. Par exemple, un changement dans les horaires de départ et d'arrivée des remorques de transport intercité peut contribuer à améliorer la performance de l'entreprise. Cependant, cela risque également d'entraîner des périodes de pointe pour la manutention des colis dans les terminus impliqués et, par conséquent, engendrer des coûts additionnels de main-d'oeuvre pour répondre à cet accroissement subit de travail ou encore une

diminution du niveau de service, i.e. des retards dans les livraisons des colis à destination.

Bref, toute décision affectant un élément du système de transport aura des répercussions sur l'ensemble du système. C'est pourquoi une approche globale, tenant compte à la fois des coûts d'opérations et des niveaux de service, est nécessaire. Et c'est justement une telle approche qui est utilisée, dans le chapitre II, pour aborder le problème spécifique faisant l'objet de cette thèse, soit la planification globale dans le transport routier des marchandises.

CHAPITRE 2

Le problème de la planification globale

Ce chapitre définit tout d'abord le problème de la planification globale dans les entreprises de transport routier des marchandises et le situe par rapport à l'horizon temporel de planification de la firme. On dresse ensuite un bilan de l'état actuel des connaissances reliées à ce problème et on résume les travaux qui ont inspiré notre recherche.

2.1 Définition du problème

Dans les entreprises manufacturières, un des problèmes les plus importants, et sans doute l'un des plus étudiés, est celui de la planification globale de la production, c'est-à-dire le choix des stratégies employées pour ajuster la production aux variations périodiques dans la demande. Parmi les stratégies les plus utilisées traditionnellement, on retrouve la variation des taux de production par l'embauche et le licenciement, le recours au surtemps et à la sous-traitance et la variation du niveau des stocks. Ainsi, il n'est pas rare qu'une entreprise manufacturière décide de produire à un rythme à peu près constant en faisant varier le niveau de ses stocks pour s'ajuster aux variations saisonnières dans la demande pour ses produits. Le recours à ce genre de stratégie n'est cependant pas possible pour des entreprises de service, comme les entreprises de transport, qui ne peuvent pas "stocker" leur production. Le problème de la planification globale pour les entreprises de service

est donc aggravé du fait que seuls des ajustements dans l'offre de service peuvent équilibrer les variations saisonnières dans la demande (si l'on fait abstraction des différentes stratégies promotionnelles visant à influencer directement la demande pour la régulariser, e.g. prix réduits durant les périodes de faible demande), (Buffa, 1977).

Or, on sait que la demande pour les services de transport subit d'importantes variations au cours d'une année en fonction d'une part, de la saisonnalité de la production et de la consommation des différentes marchandises transportées et, d'autre part, de la conjoncture économique. C'est pourquoi les entreprises de transport se doivent d'ajuster leur offre de service en fonction de ces variations de volume en apportant des modifications périodiques à leur plan opérationnel de transport, c'est-à-dire en faisant varier la fréquence des départs et même les itinéraires empruntés selon la demande, tout en maintenant un niveau de service leur permettant de conserver ou encore d'accroître leur part du marché.

Un exemple

A titre d'exemple, supposons que l'on veuille planifier les opérations à l'approche d'une période de demande accrue pour les services de transport (typiquement, le printemps et l'automne). Si aucune modification n'est apportée au plan opérationnel, il est fort possible que la capacité actuelle ne suffise pas à la tâche et que le service offert soit inadéquat, trop de marchandises étant laissées sur les quais de chargement. Il faut donc planifier une augmentation de la capacité du système

de transport. Cela peut se faire de différentes façons:

1) Augmenter le nombre de remorques et, par conséquent, leur fréquence de départ sur les différents segments de route exploités. Ceci aura pour effet d'accroître les coûts de transport intercité qui varient proportionnellement au nombre de déplacements sur un segment de route donné.

2) Ne pas augmenter les fréquences de service mais plutôt rediriger le trafic restant sur les quais de chargement vers d'autres terminus (dits de consolidation) en modifiant leur itinéraire. Cette stratégie aura pour conséquences: 1) d'augmenter les coûts de manutention à cause de la double manutention du trafic au terminus de consolidation; 2) d'augmenter le temps de service moyen offert sur ce marché par rapport à celui obtenu en utilisant un itinéraire direct, et 3) d'accroître la congestion au terminus de consolidation en augmentant le taux d'utilisation de la capacité de ce terminus à un point tel que l'on doive en tenir compte en étudiant les phénomènes de file d'attente qui s'y manifesteront.

3) Utiliser une stratégie mixte combinant les deux options précédentes.

Selon la stratégie utilisée, des changements importants se produiront donc au niveau des coûts d'opération (transport intercité, coûts de manutention) et des niveaux de service offerts (rapidité et fiabilité du temps de service). De plus, une augmentation du volume de marchandises transportées risque d'aggraver les déséquilibres existant entre le nombre d'arrivées et de départs de remorques à chaque terminus du réseau.

Ces déséquilibres engendrent le déplacement de remorques vides afin de les retourner aux terminus déficitaires.

2.1.1 L'horizon temporel de planification

Pour mieux situer le problème qui nous intéresse par rapport à son horizon temporel de planification, on peut recourir à une typologie classique des décisions selon leur niveau de planification: stratégique, tactique et opérationnel (Anthony, 1965).

Au niveau stratégique, on retrouve des décisions qui impliquent habituellement une grande partie de l'organisation, qui ont des incidences financières importantes et qui ont une portée à long terme. Dans les entreprises de camionnage, ces décisions sont typiquement reliées à la conception du système de transport (Figure I, chapitre I), c'est-à-dire au choix:

1) du type de marchandises transportées;

2) des territoires desservis;

3) des niveaux de services offerts à la clientèle ainsi que

4) de la configuration du réseau de terminus requis.

Ces choix déterminent en quelque sorte la posture stratégique de l'entreprise de transport et devraient donc être révisés périodiquement à la lumière des changements continuels qui se produisent dans l'environnement particulier du transporteur.

Il semblerait cependant que les entreprises de transport oeuvrant dans un environnement réglementé (voir chapitre I) ne soient pas tellement intéressées à la planification stratégique. Une étude réalisée par Kallman et Gupta (1979) avant la "déréglementation" de l'industrie du camionnage aux Etats-Unis, révèle en effet qu'à l'époque, très peu de transporteurs routiers américains planifiaient plus d'un an à l'avance et que la plupart de ceux qui s'adonnaient à la planification le faisaient de façon informelle. Les auteurs expliquent ce phénomène par:

1) la réglementation de l'industrie qui vient limiter le contrôle des transporteurs sur leurs principales options stratégiques;

2) la difficulté qu'ont les entreprises de transport à gérer la partie la plus importante de leurs coûts, soient les frais de main-d'oeuvre dont l'évolution à long terme est largement influencée par le puissant syndicat des "Teamsters", et

3) par la structure même de l'industrie qui est composée majoritairement de petites entreprises et qui ne renferme que très peu d'entreprises de la taille de celles qui utilisent couramment des modèles de planification stratégique (i.e. des entreprises générant des revenus annuels supérieurs à $100 millions).

Il va sans dire que les assouplissements qui se sont produits dans la réglementation de l'industrie du camionnage aux Etats-Unis, en 1980, et, plus récemment, de façon moins prononcée au Canada, devraient susciter un regain d'intérêt des transporteurs pour la planification à long terme. De toute façon, les choix effectués au niveau stratégique vont déterminer

le cadre à l'intérieur duquel les décisions tactiques et opérationnelles seront prises.

On situe généralement le niveau tactique quelque part entre la planification stratégique à long terme et la gestion opérationnelle à très court terme. On parlera alors de planification à court ou à moyen terme d'activités telles l'achat ou le remplacement d'équipement et l'ajustement de la capacité de production à partir des prévisions de la demande et de la disponibilité des capitaux. Dans l'industrie du camionnage, les décisions prises au niveau tactique peuvent porter sur un horizon de quelques années, comme dans le cas de l'achat d'équipement de manutention ou le remplacement du matériel roulant, ou encore sur un horizon de quelques mois comme dans l'établissement des différents itinéraires et plans de fréquence afin de s'ajuster aux variations saisonnières de la demande (problème faisant l'objet de notre recherche).

Néanmoins, on accorde parfois un autre sens à la planification tactique. Ainsi, Bowersox (1978) définit la planification tactique comme une procédure visant à s'adapter à des événements imprévus ou à manifestation irrégulière à l'intérieur d'une période de planification des opérations pouvant s'étendre jusqu'à un an. Cette procédure développe des plans de contingence qui décrivent les ajustements à apporter face à des événements qui étaient possibles mais peu probables lorsque le plan opérationnel a été mis au point.

Nous allons cependant retenir, ici, la première définition, plus générale, du niveau tactique de planification qui vient, à son tour, in-

fluencer les décisions prises au niveau opérationnel. Ces dernières concernent donc la gestion à très court terme, souvent quotidienne et parfois en temps réel des opérations. On se préoccupe davantage des détails et on se situe souvent à des niveaux hiérarchiques peu élevés dans l'organisation. A partir des plans de fréquences et des itinéraires établis au niveau tactique, on procédera à l'affectation de l'équipement et on élaborera des horaires de transport qui seront mis à jour sur une base quotidienne en fonction des données réelles sur la demande et la disponibilité d'équipement. A très court terme, la planification opérationnelle se confond au contrôle des opérations en vue de maintenir le système en équilibre.

2.1.2 L'objet de notre recherche

L'objectif de notre recherche est de proposer un modèle de planification globale des opérations de transport routier des marchandises en lots brisés. En particulier, notre modèle servira à déterminer, pour une période de planification donnée,

1) quels services (segments de route) un transporteur devrait opérer et avec quelle fréquence;

2) quel(s) itinéraire(s) la marchandise devrait emprunter de son origine à sa destination;

3) comment planifier et utiliser le retour à vide des remorques d'une façon efficiente.

L'outil que nous proposons n'est donc pas conçu pour la planification à très court terme mais s'insère plutôt dans le processus de planification à court ou à moyen terme, i.e. au niveau de la planification tactique des opérations. De plus, nous excluons de notre étude les opérations de cueillette et livraison des marchandises pour nous concentrer uniquement sur les opérations de transport intercité et de manutention dans les terminus, soient celles qui varient en fonction du plan de fréquence et des itinéraires choisis. Enfin, le modèle proposé a la forme générale d'un modèle d'optimisation mixte et adopte une approche systémique en cherchant un compromis entre la minimisation des coûts des opérations étudiées et la recherche d'un service rapide et fiable.

2.2 Etat actuel des connaissances

La gestion des opérations dans les entreprises de transport routier des marchandises est un domaine de recherche qui fut passablement négligé par le passé. Malgré l'importance du problème décrit ci-haut, les efforts en vue d'améliorer la planification globale des opérations de transport routier des marchandises sont relativement récents. Cette situation peut s'expliquer par l'absence quasi absolue, avant le début des années 1970, de systèmes d'information permettant aux gestionnaires, ainsi qu'aux chercheurs, de disposer, avec un certain degré de précision, de données nécessaires à la planification de réseaux de transport de grande taille.

2.2.1 Les modèles d'évaluation

Parmi les premiers efforts de modélisation visant à améliorer la planification des opérations de transport routier, on peut citer le modèle proposé par Terziev et al. (1978). Il s'agit d'un modèle d'offre tenant compte de tous les éléments d'opération, allant de la cueillette de la marchandise jusqu'à sa livraison, en passant par la manutention dans les terminus et le transport intercité (voir Figure II, chapitre I). Le modèle a pour but d'aider les gestionnaires à évaluer différentes stratégies d'opération sur un réseau de transport en mesurant leur impact sur les coûts d'opération et sur les niveaux de service (rapidité et fiabilité des temps de transit). Pour ce faire, le modèle d'évaluation requiert trois types de données:

1) La configuration du réseau, i.e. les caractéristiques de tous les terminus du réseau ainsi que les distances qui les séparent les uns des autres.

2) Une stratégie ou un plan d'opération incluant:

   (i) les itinéraires suivis par la marchandise depuis son origine jusqu'à sa destination finale;

   (ii) les fréquences de service, c'est-à-dire le nombre de départs de remorques prévus pour chaque segment de route du réseau ainsi que les règles en gouvernant la modification;

   (iii) le nombre d'employés et de véhicules disponibles en période de pointe, et

   (iv) l'affectation du transport intercité aux différents terminus du réseau.

3) La distribution de la demande par marché (paire origine-destination). Cette distribution donne la probabilité pour qu'un certain volume de

marchandises soit expédié sur un marché donné, n'importe quel jour de la semaine.

A partir de ces données, le modèle évalue la distribution du temps de transit pour chaque marché, calcule les coefficients d'utilisation de l'équipement à chaque terminus, et détermine les coûts associés aux différentes opérations: transport intercité, manutention dans les terminus, cueillette et livraison. Malheureusement, il ne semble pas, à notre connaissance, que ce modèle ait été utilisé ou expérimenté à l'aide de données réelles (Roberts, 1982).

Plus récemment encore, Barker et al. (1981) ont développé et implanté un autre modèle d'évaluation dans une grande entreprise de camionnage aux Etats-Unis: ANR Freight Systems Inc. Ce modèle peut être utilisé en mode interactif et, comme le précédent, il mesure les conséquences en termes de coûts et de niveaux de service des différents plans d'opération qui lui sont soumis. Les données requises pour le fonctionnement du modèle sont:

1) la demande, exprimée en tonnage à transporter pour une journée moyenne, pour chaque marché (origine-destination du trafic);

2) les coûts de transport intercité spécifiques à chaque segment de route ainsi que les coûts de manutention dans les terminus de consolidation;

3) la capacité des camions, pour chaque segment de route;

4) les niveaux de service requis, selon le cas.

A partir de ces données, les auteurs ont examiné la possibilité de développer un modèle d'optimisation pour déterminer le meilleur plan de chargement ("loading guide") possible pour acheminer la marchandise à travers le réseau. Ils ont dû, cependant, renoncer à ce projet compte tenu de la difficulté de résoudre un tel modèle d'optimisation non-linéaire de grande taille à un coût raisonnable, à l'intérieur des contraintes de temps établies par la direction de la compagnie. Ils ont donc développé un modèle d'évaluation pouvant être utilisé en mode interactif, pour assister les répartiteurs dans la planification opérationnelle (à très court terme) du cheminement des marchandises, à partir du plan de chargement couramment utilisé par la compagnie. Ce modèle fonctionne de la manière suivante:

1) A partir du plan de chargement de la compagnie, le modèle regroupe toute la marchandise passant par les terminus de consolidation afin de déterminer le nombre de départs nécessaires (fréquences de service). Ce nombre est déterminé en se basant sur le nombre maximum requis pour a) avoir suffisamment de capacité pour transporter toute la marchandise ou pour b) satisfaire les niveaux de service désirés.

2) Après avoir transporté toute la marchandise, le modèle détermine ensuite, pour chaque terminus, le nombre de camions requis pour rééquilibrer le réseau. Ce rééquilibrage s'effectue à l'aide de la programmation linéaire.

3) Finalement, le modèle analyse chacun des itinéraires de la façon suivante:

(i) pour chaque marché desservi directement, le modèle détermine s'il est avantageux en termes de coûts ou de niveaux de service de faire transiter la marchandise par un terminus de consolidation;

(ii) pour tous les marchés étant déjà desservis par des itinéraires indirects, le processus inverse s'applique, i.e. le modèle évalue l'avantage associé à un transport direct.

A la fin d'une séance, le modèle peut produire, sur demande, différents rapports portant sur l'utilisation de l'équipement de transport et des terminus de consolidation, les niveaux de service ainsi que les coûts de transport et de manutention. Dans le même article, Barker et al. (1981) proposent également une procédure régissant le nombre de charges entières ("truckloads") à partir 1) du déséquilibre engendré par le transport de lots brisés et calculé par le modèle précédent, et 2) de la demande pour le transport de charges entières obtenue à partir de données historiques.

Ce qui caractérise les deux modèles d'évaluation précités, c'est leur nature descriptive. Bien qu'ils permettent aux gestionnaires d'évaluer leurs stratégies de transport et de constater les compromis qui s'opèrent entre les coûts d'opération et les niveaux de service, ces modèles offrent peu d'assistance pour générer des solutions globales au problème de planification des opérations de transport intercité et encore moins pour rechercher des solutions optimales à un problème d'aussi grande taille, en général. A l'exception de notre travail, une seule autre recherche, à notre connaissance, vise à atteindre cet objectif. Il

s'agit du projet des professeurs Warren B. Powell de l'Université Princeton et Yosef Sheffi du M.I.T. (1983) qui travaillent au développement d'un logiciel pour la planification des opérations de transport intercité pour le compte de la compagnie Ryder Truck Lines, filiale de I.U. International, Inc.

2.2.2 Le modèle de Powell et Sheffi

Dans un article récent, les professeurs Powell & Sheffi (1983) décrivent ce qu'ils appellent le "Load Planning Problem" comme étant la détermination du chemin (itinéraire) que devrait suivre la marchandise à travers un réseau afin de minimiser les coûts tout en maintenant le service à un niveau acceptable. Il s'agit donc d'un problème sensiblement équivalent au nôtre à l'exception du réseau qui se compose, dans leur cas, de deux types de terminus, c'est-à-dire ceux d'origine et de destination ("end-of-line terminals") et les terminus de consolidation ("break-bulk terminals") tandis que dans notre cas, tous les terminus peuvent remplir les deux rôles à la fois. Les auteurs présentent une formulation optimale du problème sous la forme d'un modèle de programmation mathématique de grande taille, en variables mixtes.

Dans cette formulation, tous les terminus sont représentés par un seul noeud à l'exception des terminus de consolidation qui sont représentés par deux noeuds reliés par un arc symbolisant la manutention de la marchandise. On a donc deux ensembles d'arcs: le premier, L, formé des arcs reliant les terminus et le second, B, renfermant les arcs symbolisant

la manutention dans les terminus de consolidation. Les principales variables décisionnelles sont les variables booléennes, y_{ij}^{s}, qui déterminent à chaque noeud, i, quelle sera la prochaine étape, j, de la marchandise compte tenu de sa destination finale, s. Ainsi, l'ensemble de toutes ces variables décisionnelles {y} détermine un chemin unique entre chaque origine et destination, i.e. un itinéraire unique pour chaque marché. A partir de ces itinéraires et de la demande pour chaque marché, on peut calculer la quantité de marchandises x_{ij}, exprimée en charges entières ("truckloads"), circulant sur chacun des arcs (i,j) du réseau durant la période de planification.

La fonction objectif consiste à minimiser la somme des coûts de transport et de manutention. Or, les coûts de transport varient en fonction de la fréquence, F_{ij}, des départs des remorques sur chacun des arcs $i,j \in L$. Dans sa formulation actuelle, le modèle de Powell et Sheffi (1983) ne représente pas les fréquences F_{ij} comme des variables décisionnelles, comme il serait souhaitable de le faire, mais les définit plutôt en fonction du volume, x_{ij}, circulant sur les arcs. On pose donc:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x = 0 \\ F_{min} & 0 < x \leq F_{min} \\ x & x > F_{min} \end{cases}$$

où F_{min} représente la fréquence minimale nécessaire pour maintenir un service adéquat lorsque le volume de marchandises transportées est faible. Quant aux coûts de manutention, ils varient en fonction du volume

de marchandises manutentionnées dans les terminus de consolidation, c'est-à-dire en fonction de x_{ij} lorsque $i,j \in B$. Enfin, le problème doit être résolu en satisfaisant les contraintes d'unicité des itinéraires pour chaque paire origine-destination, de demande pour chaque marché et de service en comparant le temps de transit prévu à la norme de service pour chaque marché. Avant de présenter la formulation complète du modèle de Powell et Sheffi, nous définissons la notation utilisée:

L	: l'ensemble de tous les arcs orientés reliant les terminus
B	: l'ensemble de tous les arcs représentant la manutention des marchandises dans les terminus de consolidation
T	: l'ensemble de tous les terminus
N	: l'ensemble de tous les noeuds
r	: le terminus d'origine de la marchandise du marché rs
s	: le terminus de destination finale de la marchandise du marché rs
C_{ij}	: le coût unitaire de transport de i à j; $i,j \in L$
H_{ij}	: le coût unitaire de manutention sur l'arc i,j; $i,j \in B$
x_{ij}	: le volume de marchandise, en charges entières, circulant sur l'arc i,j
F_{ij}	: la fréquence de service, i.e. le nombre de départ de remorques, par période sur l'arc i,j
Q^{rs}	: la demande, en charges entières, de r à s
$t_{ij}(x_{ij})$	: le temps total de transit de i à j
S^{rs}	: le temps maximal permis pour transporter la marchandise du marché rs.

Alors, l'objectif est de trouver la valeur des variables y_{ij}^{s} qui minimise la fonction objectif suivante:

$$\text{minimiser } Z = \sum_{i,j \in L} C_{ij} F_{ij}(x_{ij}) + \sum_{i,j \in B} H_{ij} x_{ij}$$

sujet aux contraintes suivantes:

$$\sum_{j} y_{ij}^{s} = 1 \qquad \forall s \in T, \forall i \in N$$

$$x_{ij} = \sum_{r \in T} \sum_{s \in T} Q^{rs} \delta_{ij}^{rs}$$

$$\sum_{ij} t_{ij}(x_{ij}) \cdot \delta_{ij}^{rs} \leq S^{rs} \qquad \forall r,s \in T$$

où

$$y_{ij}^{s} = \begin{cases} 1 \text{ si la marchandise destinée au terminus s doit se rendre au terminus j en quittant le noeud i; } i,j \in L; \ i,s \in T \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

$$\delta_{ij}^{rs} = \begin{cases} 1 \text{ si l'arc i,j est situé sur le chemin défini par } \{y\} \text{ de r à s} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

Cependant, la taille des problèmes que l'on rencontre en réalité est telle que la formulation actuelle ne permet pas d'obtenir efficacement une solution optimale avec les algorithmes connus aujourd'hui. Les auteurs proposent donc une procédure heuristique d'amélioration locale

qui, débutant avec une solution initiale raisonnable, recherche des améliorations en termes de coût total en testant un grand nombre de petites modifications au plan d'opération original. Pour ce faire, on doit cependant simplifier quelque peu la formulation du problème. Tout d'abord, pour réduire la taille du problème, on redéfinit l'ensemble des variables décisionnelles {y} comme suit:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ si l'arc } i,j \text{ appartient au réseau} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

Le cheminement des marchandises se fait désormais sur les arcs de {y} en suivant le chemin le plus court tel que calculé par la somme des coûts de transport intercité et de manutention. Autrement dit, si un arc appartient au réseau, alors n'importe quelle marchandise pourra l'utiliser, quelle que soit sa destination finale.

La deuxième modification à la formulation originale élimine les contraintes de service en ajoutant une deuxième fonction objectif où l'on cherchera à minimiser le nombre total de chargements-jours ("truckload-days") comme approximation du niveau de service, éliminant du même coup toute référence à des normes de service que le plan devrait respecter. Alors, en cherchant à minimiser les deux fonctions objectifs, on espère obtenir une solution acceptable, à la fois en termes de coûts d'opération et de niveaux de service, même s'il n'y a pas de garantie que les normes de service seront respectées.

La procédure d'amélioration locale est ensuite exécutée en apportant différents types de modifications à la solution originale: réaffectations des terminus d'origine/destination aux terminus de consolidation, ajouts et retraits d'arcs entre les terminus d'origine/destination et les terminus de consolidation ainsi qu'entre ces derniers. Cette procédure de recherche d'améliorations peut s'effectuer en mode interactif avec la participation d'un expert qui intervient pour indiquer des directions de recherche souhaitables. De plus, pour chaque type de modification, un ordre de priorité des changements à apporter est établi en commençant 1) par les arcs les moins achalandés dans le cas des retraits d'arcs, et 2) par les changements les plus prometteurs en termes de coût dans le cas des ajouts d'arcs.

Les résultats obtenus jusqu'à présent à l'aide de cette procédure semblent très encourageants. Cependant, le modèle proposé par Powell et Sheffi (1983) ne représente pas les fréquences de départ des remorques comme des variables décisionnelles, du moins dans sa formulation actuelle. De plus, on ne tient pas compte des phénomènes de congestion qui risquent de se produire dans les terminus de consolidation lorsque le volume de marchandises manutentionnées augmente. Enfin, on ne tient compte, au mieux, que du temps de transit comme critère de service alors qu'on devrait considérer à la fois la durée et la variabilité du temps de transit comme indicateurs d'un service rapide et fiable. En ne faisant plus référence aux normes de service requises dans la reformulation du modèle, on risque, d'une part, d'augmenter inutilement les coûts d'opération en cherchant à minimiser les temps de transit en-deçà des niveaux de service

requis par la clientèle et, d'autre part, de réduire les coûts d'opération au détriment du service en choisissant des itinéraires moins coûteux mais plus longs pour acheminer la marchandise vers sa destination finale. Il n'en demeure pas moins que le travail de Powell et Sheffi apporte une contribution importante au domaine de la planification des opérations de transport routier des marchandises.

Nous allons maintenant jeter un coup d'oeil sur les travaux réalisés dans un domaine connexe au nôtre, soit celui du transport ferroviaire des marchandises, et plus particulièrement le modèle de Crainic (1982) dont nous nous sommes inspirés pour formuler et résoudre le modèle présenté dans cette thèse.

2.2.3 Le modèle de Crainic

Notre revue de l'état actuel des connaissances reliées au domaine de recherche faisant l'objet de cette thèse se termine avec la présentation d'un modèle de planification tactique pour le transport ferroviaire des marchandises proposé par Teodor G. Crainic dans sa thèse de Ph.D. (1982) et faisant l'objet d'un article récent (Crainic et al., 1984). Il s'agit d'un modèle normatif s'adressant au même genre de problème que le nôtre, soit la planification tactique, mais dans un contexte différent, celui du transport ferroviaire.

Le réseau ferroviaire est un réseau physique constitué d'un ensemble de noeuds (gares de triage, points de connexion, etc.) et d'arcs

(voies de chemin de fer). Dans la formulation de son modèle, Crainic introduit les notions de service et d'itinéraire. Un service de train est caractérisé par un noeud d'origine et de destination ainsi que par un chemin dans le réseau physique. Un itinéraire est défini comme la suite de services empruntés par la marchandise depuis son origine jusqu'à sa destination finale et spécifie les opérations effectuées aux gares intermédiaires. A partir de ces notions, il est possible de définir complètement le cheminement de la marchandise pour chaque marché, i.e. pour chaque paire origine-destination.

Le modèle comporte deux types de variables décisionnelles: les premières sont continues et représentent le volume de marchandises, exprimé en wagons, circulant sur chaque itinéraire, les secondes sont des variables entières représentant les fréquences de chaque service. La fonction objectif vise à minimiser la somme des coûts d'opération et des délais qui se manifestent à la fois dans les gares de triage et sur les voies. C'est donc au niveau de la fonction objectif que l'on retrouve les compromis à faire entre la minimisation des coûts d'opération et la minimisation des délais ou, si l'on préfère, la recherche du meilleur service possible au coût minimum. La modélisation des délais fait largement appel aux résultats obtenus dans l'étude des phénomènes de files d'attente par Petersen (1977a et b) et, plus récemment, par Turnquist et Daskin (1982). Enfin, en ajoutant au niveau de la fonction objectif un terme pénalisant les dépassements de capacité, on obtient une structure particulière où il ne reste plus, au niveau des contraintes, que celles visant à satisfaire la demande et qui sont spécifiques à chaque marché.

Pour résoudre ce modèle d'optimisation non-linéaire mixte de réseau, Crainic a su tirer profit de la structure particulière de son modèle en appliquant des méthodes de décomposition lui permettant de traiter alternativement et séparément les problèmes de la détermination des fréquences de service et de la distribution du fret sur les itinéraires. Ces techniques de résolution sont décrites de façon plus générale dans Crainic et Rousseau (1984) et font l'objet d'un examen plus poussé dans le chapitre 4 de cette thèse.

Bref, le travail de Crainic (1982) nous a inspiré au niveau de la formulation du modèle proposé au chapitre 3 de cette thèse alors que nous faisons également appel à des notions de service et d'itinéraire adaptées au contexte particulier du camionnage ainsi qu'au niveau des techniques de résolution exposées au chapitre 4.

CHAPITRE 3

Un modèle de planification globale

Ce chapitre propose une nouvelle formulation pour un modèle de planification globale des opérations de transport routier des marchandises en lots brisés. Le modèle proposé est formulé de façon à représenter au niveau de la fonction objectif les coûts de transport intercité et de manutention ainsi que les coûts de pénalité associés à un temps de service au-delà de la norme exigée, à l'utilisation d'itinéraires peu fiables et à une trop grande utilisation de la capacité des remorques de transport intercité. La définition de ces fonctions de coûts de pénalité tient compte des phénomènes de file d'attente se produisant au niveau des opérations de manutention du fret dans les terminus. C'est donc au niveau de la fonction objectif que s'établissent les compromis visant à obtenir une solution offrant un service rapide et fiable à un coût minimum. Le modèle est complété par un ensemble de contraintes visant à satisfaire la demande. En terminant ce chapitre, on suggère une nouvelle approche pour réduire les coûts associés au retour à vide des remorques.

3.1 Les paramètres du modèle

En abordant la planification du cheminement des marchandises, on doit supposer que certaines variables stratégiques et tactiques sont connues et fixes. Elles deviennent alors des paramètres ou contraintes pour le problème étudié. Dans notre cas, on suppose donc que le marché visé (marchandises générales, lots brisés, transport intercité) ainsi que les routes pouvant être desservies selon les permis accordés sont connus et respectent la réglementation gouvernementale. On connaît également l'ensemble des terminus disponibles, l'équipement utilisé (types et capacité

des remorques) ainsi que les méthodes de travail en vigueur. Enfin, la demande et les niveaux de service requis sont disponibles pour chaque paire origine-destination.

3.1.1 Les marchés

Un "marché" est défini par une paire de terminus origine-destination. La demande d'un marché s'exprime par la quantité de marchandise (en cwt [1]) à transporter d'un terminus d'origine à un terminus de destination pour une période de temps donnée [2].

Notation

- m : un marché
- O(m) : le terminus d'où la marchandise origine
- D(m) : le terminus où la marchandise est destinée
- M : l'ensemble de tous les marchés m desservis
- d_m : le nombre de cwt à transporter de O(m) à D(m), i.e. la demande du marché $m \in M$.

Exemple

Le marché m = 52 de Montréal à Toronto.

- O(52) = Montréal
- D(52) = Toronto
- d_{52} = 3200 cwt

---

1 Un cwt (ou "hundred weight") = 100 livres.

2 On utilisera normalement la semaine de cinq jours comme période de planification.

Il faut noter que ces 3200 cwt représentent uniquement la marchandise originant de Montréal pour Toronto; i.e. ils n'incluent pas la marchandise en transit à Montréal en provenance d'autres terminus pour Toronto.

3.1.2 Les modes de transport intercité

Un mode de transport est caractérisé par un type d'équipement de transport (e.g. remorque, conteneur) et le moyen de transport utilisé pour son déplacement (e.g. tracteur appartenant à l'entreprise ou à un contracteur, rail, etc.). En pratique, plusieurs modes de transport peuvent être utilisés par une entreprise de camionnage.

Notation

v : un mode de transport donné.

Exemple

Voici quelques modes de transport utilisés dans l'expérimentation du modèle avec les données de l'entreprise CNX.

Mode	
v = 1	Tracteurs et remorques CNX (27' à 45')
v = 2	Tracteurs et/ou remorques de contracteurs
v = 3	Remorques de 27' transportées par rail (TOFC [1])
v = 4	Remorques de 40' à 45' transportées par rail (TOFC)

1 TOFC signifie "Trailer On Flat Car".

v = 6 Conteneurs transportés par rail (COFC [1])

v = 7 Wagons de chemin de fer ("Box Cars")

3.1.3 Le réseau de services

Un service de transport définit un mode de transport offert sur un segment de route donné. Un service de transport est donc caractérisé par un terminus d'origine, un terminus de destination et un mode de transport. L'ensemble de tous les services de transport offerts par une entreprise de camionnage définit son réseau de services.

Notation

ℓ : un service de transport

$O(\ell)$: le terminus d'origine de ℓ

$D(\ell)$: le terminus de destination de ℓ

$v(\ell)$: le mode de transport de ℓ

L : le réseau de services, i.e. $L = \{\ell\}$

Exemples

$\ell = 341$ $\quad O(341)$ = Montréal —— v(341) = 2 (remorque, contracteur) —— $D(341)$ = Toronto

$\ell = 343$ $\quad O(343)$ = Montréal —— v(343) = 4 (remorque/rail) —— $D(343)$ = Toronto

$\ell = 401$ $\quad O(401)$ = Toronto —— v(401) = 1 (remorque, CNX) —— $D(401)$ = Vancouver

---

1 COFC signifie "Container On Flat Car".

3.1.4 Les itinéraires

Un itinéraire est la suite de services empruntés pour transporter la marchandise d'un marché donné de son origine à sa destination, ainsi que la spécification des opérations effectuées aux terminus intermédiaires.

Notation

k_m : un itinéraire du marché m

K_m : l'ensemble de tous les itinéraires du marché m

j : un terminus quelconque de l'entreprise de camionnage

J : l'ensemble de tous les terminus de la compagnie; $J = \{j\}$

$J^c_{k_m}$: l'ensemble des terminus où la marchandise du marché m est reclassifiée lorsqu'elle emprunte l'itinéraire k_m; $J^c_{k_m} \subseteq J$

L_{k_m} : l'ensemble des services empruntés par la marchandise du marché m lorsqu'elle voyage sur l'itinéraire k_m; $L_{k_m} \subseteq L$.

Exemples

Voici deux itinéraires possibles de Montréal à Vancouver, (m = 63):

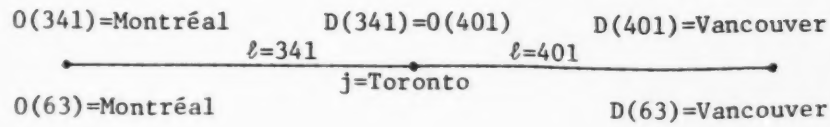
a) Transport direct par TOFC

$k_{63} = 111$ $\quad \underset{O(63) = \text{Montréal}}{O(337) = \text{Montréal}} \quad \ell = 337 \quad \underset{D(63) = \text{Vancouver}}{D(337) = \text{Vancouver}}$

$J^c_{111} = \{\ \}$

$L_{111} = \{337\}$

b) Transport routier avec consolidation à Toronto



$k_{63} = 112$

$J^2_{112} = \{\text{Toronto}\}$

$L_{112} = \{341,401\}$

3.1.5 Les variables de décision

Les variables de décision du modèle sont définies de la façon suivante:

F_ℓ : la fréquence du service ℓ, i.e. le nombre de service ℓ par période de planification (e.g. cinq jours)

x_{k_m} : la quantité de marchandises (en cwt) du marché m voyageant sur l'itinéraire k_m.

3.2 Les contraintes du modèle

3.2.1 Contrainte de demande

Pour satisfaire la demande, il faut que:

$$\sum_{k_m \in K_m} x_{k_m} = d_m \qquad \forall\, m \in M.$$

3.2.2 Contrainte de capacité

Dans l'industrie du transport, on utilise généralement le poids comme unité de mesure du chargement des remorques (Load Factor"). Cette mesure est toutefois imprécise car on charge habituellement la marchandise de type LTL de façon progressive dans les remorques jusqu'à ce que ces dernières soient remplies ou prêtes à partir en fonction d'un horaire fixe. On observe alors des variations importantes (pouvant aller jusqu'à 50%) dans le poids de remorques chargées à "pleine capacité". Il devient donc difficile d'évaluer le nombre exact de remorques requises en fonction d'une demande quotidienne, exprimée en poids. On peut néanmoins utiliser des données moyennes sur un horizon-temps d'un mois afin de réduire ces variations de capacité et ainsi obtenir un indicateur constant de la capacité d'une remorque (en cwt) pour chaque origine O(m). Nous sommes conscients qu'il s'agit ici d'une simplification des données qui ne devrait pas cependant influencer outre mesure la validité de notre modèle puisqu'il sera utilisé à des fins de planification tactique (et non quotidienne ou opérationnelle) du transport routier des marchandises.

Notation

α_ℓ : la capacité (en cwt) d'une unité de transport opérant un service ℓ. Cette capacité peut donc être spécifique à chaque origine (ce qui est réaliste puisque la densité du trafic varie souvent en fonction de son origine) et à chaque mode de transport, v, utilisé.

K_m^ℓ : l'ensemble de tous les itinéraires du marché m sur lesquels on retrouve le service ℓ; i.e. $K_m^\ell = \{k_m \mid \ell \in L_{k_m}\}$

E_ℓ : le nombre maximum d'unités de transport de type $v(\ell)$ disponibles pour le service ℓ durant la période de planification

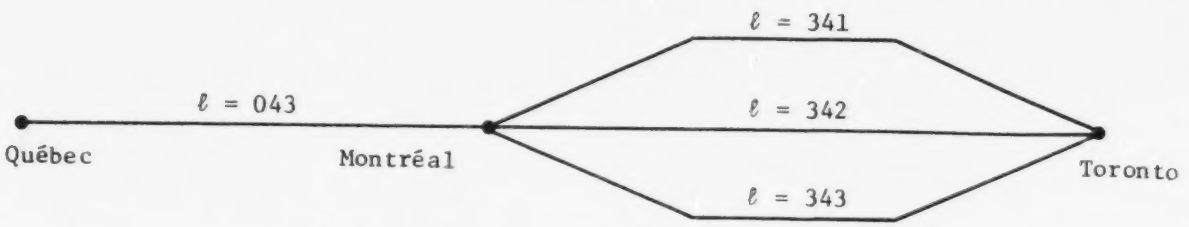
X_ℓ : le nombre de cwt empruntant le service ℓ durant la période de planification.

Alors on peut obtenir X_ℓ de la façon suivante:

$$X_\ell = \sum_{m \in M} \sum_{k_m \in K_m^\ell} x_{k_m}$$

Exemples

a) Trois itinéraires du marché Québec-Toronto (m = 22) empruntent le service (ℓ = 043) de Québec à Montréal.



(i) $k_{22} = 121$; $J^c_{121} = \{\text{Montréal}\}$; $L_{121} = \{043, 341\}$

(ii) $k_{22} = 122$; $J^c_{122} = \{\text{Montréal}\}$; $L_{122} = \{043, 342\}$

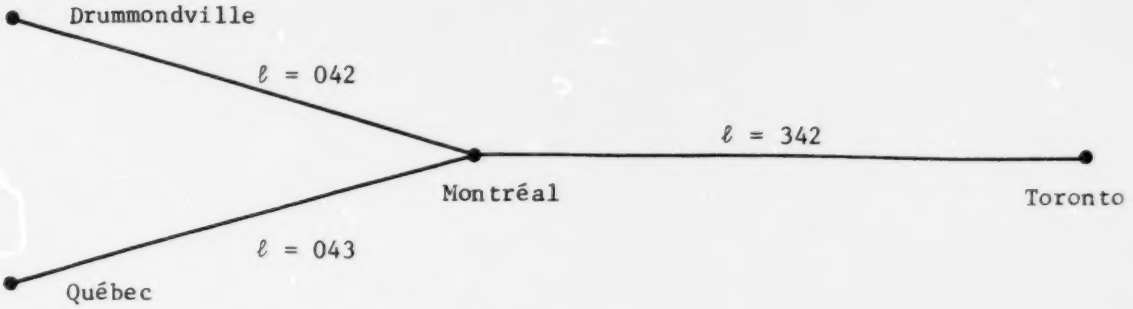
(iii) $k_{22} = 123$; $J^c_{123} = \{\text{Montréal}\}$; $L_{123} = \{043, 343\}$.

Alors $K_m^\ell = K_{22}^{043} = \{k_{22} | 043 \in L_{k_{22}}\} = \{121, 122, 123\}$.

En supposant que seul le marché m = 22 utilise le service ℓ = 043, on obtient

$$X_\ell = X_{043} = x_{121} + x_{122} + x_{123}$$

b) Trois itinéraires de marchés différents, Québec-Toronto (m = 22), Drummondville-Toronto (m = 23) et Montréal-Toronto (m = 52) empruntent le même service: $\ell = 342$.



(i) $k_{22} = 122$; $J^c_{122} = \{\text{Montréal}\}$; $L_{122} = \{043, 342\}$

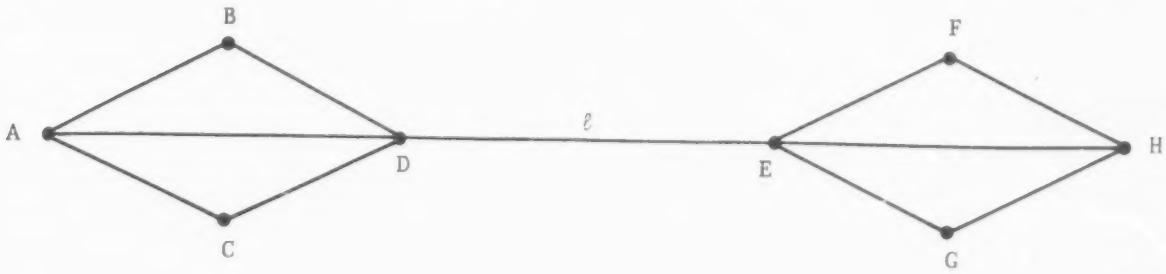
(ii) $k_{23} = 232$; $J^c_{232} = \{\text{Montréal}\}$; $L_{232} = \{042, 342\}$

(iii) $k_{52} = 408$; $J^c_{408} = \{\ \}$; $L_{408} = \{342\}$.

En supposant que seuls les marchés m = 22, 23 et 52 utilisent le service $\ell = 342$, on obtient:

$$X_\ell = X_{342} = x_{122} + x_{232} + x_{408}$$

c) Le troisième cas, qui est illustré sommairement, est celui où l'on retrouve à la fois plusieurs itinéraires d'un même marché et des itinéraires de marchés différents empruntant le même service (D-E)



On peut maintenant formuler les contraintes de capacité. Il s'agit que la fréquence de service F_ℓ soit telle que la capacité α_ℓ des unités de transport et la borne E_ℓ soient respectées, i.e.

$$X_\ell \leq \alpha_\ell F_\ell$$

$$\forall \ell \in L$$

et $$F_\ell \leq E_\ell$$

Remarque

Si $(\alpha_\ell F_\ell - X_\ell) > 0$, alors on a un surplus de capacité qui dénote une sous-utilisation de l'équipement de transport. Par contre, si $(\alpha_\ell F_\ell - X_\ell) < 0$, alors on ne peut pas transporter tout le fret, ce qui entraîne un retard ou délai de service puisque le départ de la marchandise sera retardé jusqu'au prochain départ du service ℓ. Dans ce dernier cas,

l'accumulation du fret à un terminus entraînera également du travail improductif en augmentant la congestion du terminus. Par conséquent, toute inégalité entre X_ℓ et $\alpha_\ell F_\ell$ entraînera nécessairement des coûts additionnels. D'un autre côté, lorsque le taux d'utilisation de la capacité des remorques $X_\ell/\alpha_\ell F_\ell$ s'approche de 100% (i.e. $X_\ell \simeq \alpha_\ell F_\ell$), la capacité disponible ne sera pas suffisante pour absorber la demande quotidienne lorsque cette dernière excèdera, ne serait-ce que légèrement, la demande moyenne prévue. En fait, cette situation risque de se produire souvent car la demande varie d'une journée à l'autre. Ces observations nous seront utiles, plus tard, lorsque nous examinerons la fonction objectif en tenant compte des variations aléatoires dans la demande quotidienne.

3.2.3 Résumé des contraintes

Demande:
$$\sum_{k_m \in K_m} x_{k_m} = d_m \qquad \forall\, m \in M \qquad (1)$$

Capacité:
$$X_\ell \leq \alpha_\ell F_\ell$$
$$\forall\, \ell \in L \qquad (2)$$
$$F_\ell \leq E_\ell$$

Non-négativité des variables:

$$x_{k_m} \geq 0 \qquad \forall\, k_m \in K_m \text{ et } m \in M$$
$$(3)$$
$$F_\ell \geq 0 \text{ et entier} \qquad \forall\, \ell \in L$$

3.3 La fonction objectif

La fonction objectif du modèle devrait refléter le double objectif de la minimisation des coûts de transport et de manutention et de la maximisation du service. Ces deux objectifs étant normalement contradictoires, on devra trouver une solution de compromis en cherchant à donner un service rapide et fiable à un coût minimum. Pour ce faire, la fonction objectif proposée contiendra les éléments suivants:

1) Au niveau des opérations:

   - les coûts de transport intercité selon les modes et segments de routes (services) utilisés;
   - les coûts de manutention dans les terminus de consolidation/classification.

2) Au niveau du service:

   - des coûts de pénalité associés à un temps de service au-delà de la norme exigée et à l'utilisation d'itinéraires peu fiables, faisant appel à la notion de variance dans le temps de transit.

3.3.1 Les coûts de transport intercité

Ces coûts sont spécifiques à chaque segment de route (O,D) et varient en fonction du mode de transport utilisé. Bref, l'utilisation d'un service ℓ entraîne un coût de transport C_ℓ exprimé en \$/service. Donc, le coût total de transport intercité devient:

$$\sum_{\ell \in L} C_\ell F_\ell$$

3.3.2 Les coûts de manutention dans les terminus de consolidation

Lorsque la marchandise arrête à un terminus pour y être consolidée, les opérations suivantes doivent être effectuées: déchargement, classification et chargement. Dans les entreprises de LTL, les coûts associés à ces opérations sont habituellement exprimés en fonction du poids de la marchandise manutentionnée, i.e. en $/cwt. Cependant, le coût unitaire de manutention pour de petits envois (moins de 2 cwt) peut s'avérer plus élevé que celui d'envois plus lourds (e.g. 5 ou 20 cwt) qui sont normalement manipulés par chariots élévateurs. On doit donc tenir compte à la fois du nombre d'envois, du nombre de pièces par envoi et de la catégorie de poids des envois pour évaluer correctement le coût unitaire de manutention des marchandises dans les terminus.

Dans notre cas, on ne désire évidemment pas calculer le coût exact de manutention pour chaque envoi consolidé dans un terminus donné. On cherche plutôt à obtenir une bonne évaluation du coût de manutention pour l'ensemble des envois consolidés en se basant sur des données agrégées. Pour ce faire, des coûts standards sont établis pour chaque type d'envoi, par catégorie de poids, par type de terminus. Le coût unitaire de manutention à un terminus donné peut ensuite être obtenu en calculant la moyenne pondérée des coûts standards en fonction de la distribution observée des envois par catégorie de poids à ce terminus. On devra, de plus, ajuster ces coûts unitaires en fonction des caractéristiques et de la productivité propres à chaque terminus du réseau.

Bref, pour chaque terminus j où la marchandise est susceptible d'être consolidée, un coût unitaire de manutention sera défini en tenant compte des facteurs précités.

Notation

C_j^c : le coût unitaire de manutention au terminus j (en \$/cwt)

K_{mj}^c : l'ensemble des itinéraires du marché m qui passent par le terminus j; $K_{mj}^c = \{k_m \mid j \in J_{k_m}^c\}$

X_j^c : le nombre de cwt à reclasser au terminus j.

Coût total de manutention dans les terminus de consolidation

Le coût total de manutention est obtenu comme suit:

$$\sum_{j \in J} C_j^c X_j^c = \sum_{j \in J} C_j^c \left[\sum_{m \in M} \sum_{k_m \in K_{mj}^c} x_{k_m} \right]$$

3.3.3 Les coûts de pénalité associés au niveau de service

En cherchant à minimiser les coûts de transport et de manutention, le modèle favorisera des solutions économiques en répartissant le fret de chaque marché $m \in M$ sur des itinéraires $k_m \in K_m$ employant les services $\ell \in L_{k_m}$ les moins coûteux. Ceci n'est cependant pas suffisant car on aboutira probablement à des solutions qui seront inacceptables du point de vue des temps de transit offerts aux expéditeurs. Ainsi, par exemple, si le volume de marchandises expédiées durant une période de planifica-

tion d'une semaine sur un marché donné équivaut à un chargement de remorque de 45', alors une solution consistant à expédier cette marchandise directement une fois par semaine serait complètement inacceptable dans le transport par LTL, car elle engendre un délai de cinq jours. Il faut donc également tenir compte du service en introduisant la notion de temps de transit espéré pour chaque marché. Il peut arriver cependant que même s'il est acceptable, en moyenne, le temps de service puisse varier considérablement d'une fois à l'autre de telle sorte que les clients risquent d'être insatisfaits du service reçu. En effet, on sait que la fiabilité du service est un facteur extrêmement important pour les expéditeurs dans leur choix d'un transporteur, ou même d'un mode de transport (voir chapitre 1). C'est pourquoi on devra également tenir compte de la variance du temps de transit dans le modèle proposé.

Notation

a) Variables aléatoires

T_{k_m} : le temps de transit (en heures [1]) de la marchandise empruntant l'itinéraire k_m de O(m) à D(m)

T_j^c : le temps requis pour décharger et classifier la marchandise au terminus $j \in J$, incluant le temps d'attente avant le début du déchargement

D_ℓ : le délai de fréquence associé au service ℓ. Ce délai représente le temps d'attente des marchandises au terminus $O(\ell)$ avant d'emprunter le service ℓ et inclut normalement le temps de chargement

T_ℓ : le temps requis pour le transport des marchandises par le service ℓ.

---

1 Tous les temps sont en heures.

b) Autres

$E(\ )$: l'espérance mathématique; e.g. $E(T_{k_m})$ représente le temps de transit espéré de la marchandise voyageant sur l'itinéraire k_m

$V(\ )$: la variance; e.g. $V(T_{k_m})$ représente la variance de T_{k_m}

S_m : le temps de service requis pour le marché m

C_m : le coût de pénalité, en \$/(cwt × heure^2), reflétant les conséquences d'accorder un mauvais service sur le marché m.

Les temps de transit et leur variabilité

Pour un itinéraire $k_m \in K_m$, le temps de transit T_{k_m} peut être obtenu en faisant la somme des délais de fréquence et temps de transport espérés associés à chaque service $\ell \in L_{k_m}$ empruntés et des temps espérés de manutention aux différents terminus de classification $j \in J^c_{k_m}$ ainsi qu'au terminus de destination $j = D(m)$. On obtient donc:

$$T_{k_m} = \left(\sum_{\ell \in L_{k_m}} D_\ell + T_\ell \right) + \left(\sum_{j \in J^c_{k_m}} T^c_j \right) + T^c_{D(m)}$$

Puisque les variables du membre droit de l'expression précédente sont vraisemblablement indépendantes, on obtient également les expressions suivantes pour les temps de transit espérés et leur variance:

$$E(T_{k_m}) = \left[\sum_{\ell \in L_{k_m}} E(D_\ell) + E(T_\ell) \right] + \left[\sum_{j \in J^c_{k_m}} E(T^c_j) \right] + E(T^c_{D(m)})$$

$$V(T_{k_m}) = \left[\sum_{\ell \in L_{k_m}} V(D_\ell) + V(T_\ell) \right] + \left[\sum_{j \in J^c_{k_m}} V(T^c_j) \right] + V(T^c_{D(m)})$$

Exemple

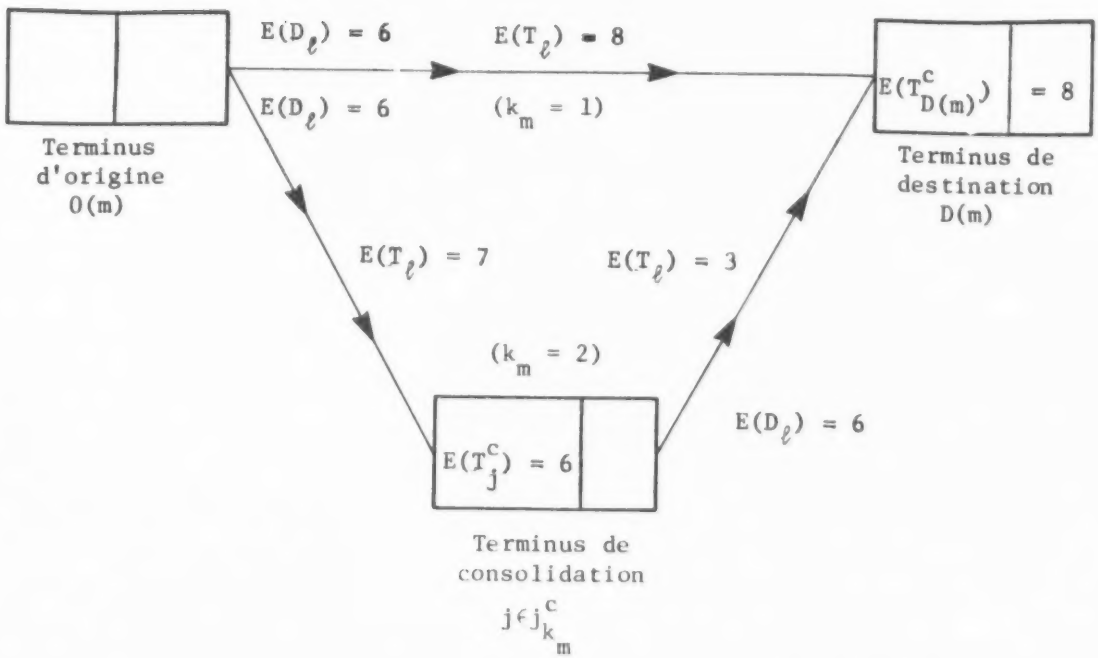
Cette approche est illustrée à la figure V où deux itinéraires sont utilisés pour transporter la marchandise du marché m. Supposons que 75% de la marchandise est transportée par le premier itinéraire, $k_m = 1$, directement du terminus d'origine O(m) au terminus de destination D(m); i.e. $x_1 = 0,75\ d_m$. Alors le reste de la marchandise du marché m sera transporté sur le deuxième itinéraire, $k_m = 2$, passant par un terminus de consolidation, $j \in J_2^c$ et on aura $x_2 = 0,25\ d_m$.

Le calcul des temps de transit s'effectue en cumulant les temps et délais rencontrés sur chaque itinéraire. Puisque les départs et arrivées des remorques aux terminus se font généralement en suivant un horaire régulier, on a divisé la journée en deux périodes de 12 heures. La première, de minuit à midi, correspond habituellement à l'arrivée des remorques pour déchargement, classification et livraison le matin de la marchandise reçue durant la nuit. Durant la seconde période, de midi à minuit, on fait la tournée des clients pour ramasser la marchandise qui sera ensuite acheminée au terminus pour classification, puis chargée dans des remorques qui quitteront le terminus dans la soirée à destination d'autres villes. En supposant ainsi des départs réguliers, tous les jours, des terminus d'origine et de classification, on obtient un délai de fréquence espéré de 6 heures dans chaque cas.

On estime ensuite les temps requis pour transporter la marchandise d'un terminus à l'autre, selon les services utilisés; i.e. on définit les T_ρ. Dans le cas du deuxième itinéraire, on doit également tenir compte

FIGURE V

Exemple de calcul des temps moyens de transit



$E(T_1) = 6 + 8 + 8 = 22$ heures

$E(T_2) = 6 + 7 + 6 + 6 + 3 + 8 = 36$ heures

des temps et délais de classification au terminus j et y ajouter les délais de fréquence (ou service) pour le prochain départ vers le terminus de destination. Enfin, une fois arrivée à destination, la marchandise de tous les itinéraires $k \in K_m$ devra être déchargée et classifiée pour la livraison locale, d'où l'addition du terme $E(T^c_{D(m)})$.

En se référant à la figure V, on s'aperçoit que la stratégie illustrée dans cet exemple résulte en des temps moyens de transit de 22 et 36 heures pour les itinéraires 1 et 2, respectivement.

Les temps de service requis

Soit S_m le temps de service désiré par l'entreprise ou encore par les clients du marché m$\in$M. Si $E(T_{k_m}) < S_m$, alors on peut affirmer que l'itinéraire k_m satisfait, en moyenne, les attentes de temps de service du marché m. Si par contre, $E(T_{k_m}) > S_m$, alors on ne peut pas espérer que la marchandise empruntant k_m atteigne D(m) dans les temps requis. La fonction objectif devrait donc refléter cette situation en pénalisant les temps de transit trop élevés.

Une autre approche pourrait cependant s'avérer plus conforme à la réalité pour bon nombre d'entreprises. Il s'agit de segmenter un marché m en deux ou plusieurs groupes correspondant aux différentes catégories de clients desservis dans ce marché m. Il est en effet courant de classer les clients selon une analyse ABC; les clients les plus importants et/ou profitables appartenant à la catégorie A, et ainsi de suite. Il serait alors possible de définir des niveaux de service propres à chaque catégorie et de les comparer aux temps de transit espérés des divers itinéraires possibles. On peut illustrer cette approche à l'aide de l'exemple de la figure V. Si tous les clients du marché m doivent être desservis également dans un temps S_m de 24 heures, alors on se rend compte que seules les marchandises empruntant l'itinéraire no 1 seront acheminées à destination dans les temps requis. En effet, on obtient

$$E(T_1) = 22 \text{ heures} < S_m = 24 \text{ heures}$$

et

$$E(T_2) = 36 \text{ heures} > S_m = 24 \text{ heures.}$$

Supposons maintenant que le marché m se décompose en deux segments m_1 et m_2 ayant les caractéristiques suivantes: m_1 représente 60% du marché et requiert un temps de service S_{m_1} de 24 heures, tandis que m_2 représentant 40% du marché m ne requiert qu'un service de 48 heures. Alors, en supposant également que l'on puisse s'assurer que la marchandise du segment m_1 soit acheminée à sa destination par l'itinéraire no 1, on peut ainsi satisfaire les exigences du marché m. Pour les fins du modèle, la segmentation du marché m entraînera la création de deux nouveaux marchés m_1 et m_2 ayant des temps de service S_{m_1} et S_{m_2} différents mais des terminus d'origine, O(m), et de destination D(m), communs.

Les coûts de pénalité

Les entreprises de camionnage sont conscientes que le temps de transit de la marchandise expédiée sur un quelconque itinéraire k_m peut varier, parfois sensiblement, d'une fois à l'autre. C'est pourquoi les temps de service S_m promis (ou requis) sont souvent accompagnés d'un pourcentage P_m représentant la fiabilité du service offert. Ainsi, par exemple, on promettra un service de 48 heures, 80% du temps, sur un mar-

ché donné. Autrement dit, on affirme que la probabilité pour que T_{k_m} soit supérieure à S_m est inférieure à 20%:

$$P[T_{k_m} \geq S_m] \leq 0.20.$$

Mais comment peut-on calculer cette probabilité? Il faut tout d'abord connaître la distribution du temps de transit, c'est-à-dire de la variable aléatoire T_{k_m}. Pour ce faire, nous allons considérer deux cas. Dans le premier cas, nous supposons que T_{k_m} suit une distribution normale; ce sera le "cas normal". Dans le deuxième cas, nous supposons que la distribution de T_{k_m} n'est pas connue; il s'agira du "cas général".

Notation

$\sigma(T_{k_m})$: l'écart-type de T_{k_m} ; $\sigma(T_{k_m}) = [V(T_{k_m})]^{\frac{1}{2}}$

n : tout nombre positif

P_m : la fiabilité du service requis sur le marché m (en pourcentage).

1er cas: le cas normal

Tout d'abord, posons [1]:

$$S_m = E(T_{k_m}) + n\,\sigma(T_{k_m})$$

---

1 On pourrait également définir un temps de service S_{k_m} spécifique à chaque itinéraire k_m du marché m. Dans notre cas particulier, on préfère cependant supposer que $S_{k_m} = S_m$, $\forall k_m \in m$.

Alors la probabilité pour que le temps de transit excède la norme de service exigée devient:

$$P[T_{k_m} \geq S_m] = P[T_{k_m} \geq E(T_{k_m}) + n\sigma(T_{k_m})]$$

Si le temps de transit T_{k_m} suit une distribution normale, alors n devient un facteur de service relié à la fiabilité P_m exigée. Ainsi, par exemple, lorsque $P_m = 80\%$, n sera égal à 0,842. Le tableau VII donne quelques valeurs de n ainsi que les probabilités et fiabilités de service correspondantes.

Des coûts de pénalité de service doivent être affectés à la marchandise empruntant un itinéraire k_m tel que les niveaux de service S_m et P_m requis ne sont pas respectés, c'est-à-dire lorsque:

$$S_m < E(T_{k_m}) + n\sigma(T_{k_m})$$

Conséquemment, nous proposons l'expression suivante pour les coûts de pénalité associés à un service inadéquat:

$$\sum_{m \in M} \sum_{k_m \in K_m} C_m x_{k_m} \{\min[0, S_m - E(T_{k_m}) - n\sigma(T_{k_m})]\}^2$$

Il peut être utile de rappeler ici que les coûts unitaires de pénalité de service C_m peuvent varier d'un marché à l'autre car il est bien connu que tous les marchés n'ont pas la même importance et encore

TABLEAU VII

Aire sous la courbe normale centrée et réduite

n^*	$P[T_{k_m} \geq S_m]^{**}$	$1 - P[T_{k_m} \geq S_m]^{***}$
0.000	0.5000	0.5000
0.500	0.3085	0.6915
0.524	0.3000	0.7000
0.842	0.2000	0.8000
1.000	0.1537	0.8413
1.282	0.1000	0.9000
1.645	0.0500	0.9500
1.960	0.0250	0.9750
2.000	0.0228	0.9772
2.326	0.0100	0.9900
3.000	0.0014	0.9986
3.090	0.0010	0.9990

* n représente le nombre d'unités d'écart-type.

** $P[T_{k_m} \geq S_m] = P[T_{k_m} \geq E(T_{k_m}) + n\,\sigma(T_{k_m})]$.

*** Ces valeurs représentent la fiabilité du service, P_m, en fonction de n.

moins la même profitabilité pour un transporteur. En fait, une façon d'obtenir C_m est justement d'évaluer la profitabilité (en $/cwt) de chaque marché et de diviser ce nombre par le carré du nombre d'heures de retard suffisant pour décourager un expéditeur d'avoir recours aux services d'un transporteur à l'avenir. Bref, C_m représente les conséquences (e.g. manque à gagner) pour un transporteur d'accorder un mauvais service, par unité de cwt sur un marché donné. On note également que l'élévation au carré des écarts de temps de service dans l'expression précédente reflète assez bien la réalité (en plus de fa-

ciliter les calculs) car les conséquences d'un retard dans le temps de service augmentent rapidement avec la durée de ces retards.

De plus, puisqu'aucun avantage tangible n'est généralement obtenu en accordant un niveau de service supérieur à ce qui est exigé, l'expression précédente est réduite à zéro lorsque: $S_m \geq E(T_{k_m}) + n\sigma(T_{k_m})$.

2e cas: le cas général

Supposons maintenant que la distribution du temps de transit ne soit pas connue. Alors, en posant:

$$S_m = E(T_{k_m}) + n\sigma(T_{k_m})$$

et

$$n = (1 - P_m)^{-\frac{1}{2}}, \quad n \geq 1$$

on obtient, par l'inégalité de Bienaymé-Chebyshev (voir, par exemple, Meyer, 1970), l'expression suivante de la probabilité pour que le temps de transit T_{k_m} soit supérieur à la norme S_m de service requise:

$$P[T_{k_m} \geq E(T_{k_m}) + n\sigma(T_{k_m})] \leq \frac{1}{n^2} \qquad \forall k_m \in K_m$$

En remplaçant n par sa valeur, on obtient l'expression suivante pour les coûts de pénalité associés à un service inadéquat:

$$\sum_{m \in M} \sum_{k_m \in K_m} C_m x_{k_m} \left\{ \min \left[0, \; S_m - E(T_{k_m}) - \frac{\sigma(T_{k_m})}{(1-P_m)^{\frac{1}{2}}} \right] \right\}^2$$

TABLEAU VIII

Valeurs de n pour différents niveaux de fiabilité et selon deux cas limite

Fiabilité (P_m)	Valeurs de n selon le cas normal	Valeurs de n selon le cas général
50 %	0.00	1.41
60 %	0.25	1.58
70 %	0.52	1.83
80 %	0.84	2.24
90 %	1.28	3.16
95 %	1.65	4.47
99 %	2.33	10.00

Remarque

Le tableau VIII illustre la différence entre le cas normal et le cas général en présentant les valeurs de n associées à différents niveaux de fiabilité. On constate ainsi que lorsque la fiabilité P_m requise est de 80%, par exemple, il faudra que $E(T_{k_m}) + 0.84\,\sigma(T_{k_m})$ soit inférieur à S_m pour éviter des coûts de pénalité lorsque le temps de transit T_{k_m} suit une distribution normale. Par contre, si la distribution de T_{k_m} est inconnue, alors il faudra que $E(T_{k_m}) + 2.24\,\sigma(T_{k_m})$ soit inférieur à S_m pour éviter des coûts de pénalité pour service inadéquat.

3.4 Dérivation des éléments du temps de transit

Dans les sections suivantes, nous allons nous inspirer de la théorie des files d'attente pour dériver des expressions pour les délais de fréquence et les temps de manutention aux terminus de classification et de destination ainsi que leurs variances. Quant aux temps requis pour le transport, les expressions $E(T_\ell)$ et $V(T_\ell)$ sont tout simplement obtenues en calculant les moyennes et variances sur la base des temps observés pour une période de temps donnée.

3.4.1 Délais de fréquence et leur variance

Supposons que la marchandise devant emprunter le service ℓ arrive aux quais de chargement d'un terminus de façon aléatoire (e.g. selon un processus Poisson). Cette marchandise devra attendre le départ de la prochaine remorque du service ℓ dans laquelle elle sera chargée en lots de α_ℓ unités. On peut donc représenter cette situation comme un modèle de file d'attente avec service en lots où le serveur est la remorque du service ℓ. Le temps de service sera alors l'intervalle de temps entre deux départs successifs de remorques du service ℓ. Le délai de fréquence est alors obtenu en calculant le temps moyen d'attente dans la file dérivé d'un tel modèle de file d'attente.

Le temps moyen d'attente dans la file peut être obtenu assez simplement si l'on suppose que 1) la marchandise arrive de façon aléatoire dans le temps et que 2) la remorque du service ℓ prend toute la marchandise disponible au moment du chargement. Or, la première hypothèse ne

comporte pas tellement de difficultés car la marchandise arrivant au quai de chargement provient, soit de la cueillette de la journée, soit d'un autre terminus du réseau et, dans les deux cas, elle a été déchargée et classée avec un taux de service exponentiel comme on le verra à la section suivante. La deuxième hypothèse est cependant beaucoup plus difficile à accepter car elle implique que les remorques peuvent prendre toute la marchandise disponible au moment du chargement; ce qui signifie qu'il n'existe pas de contraintes sur la capacité des remorques. Or, on sait que la taille des lots pouvant être chargés dans les remorques du service ℓ est limitée par la capacité α_ℓ des remorques de ce service. Dans une étude antérieure, Petersen (1971) affirme cependant que la taille des lots de service, α_ℓ, affecte très peu les résultats des calculs de délais de fréquence pour des valeurs de α_ℓ supérieures à 25. En effet, Petersen note que l'erreur commise en approximant le cas $\alpha_\ell = 50$ par $\alpha_\ell = \infty$ est négligeable à 0.1% près. Puisque la capacité de nos remorques est de l'ordre de 50 expéditions (i.e. environ 250 cwt), on peut simplifier les calculs, dans un premier temps, en utilisant les résultats obtenus lorsque la taille des lots s'approche de l'infini ($\alpha_\ell \to \infty$). Cette simplification est d'autant plus justifiable lorsque le taux d'utilisation des remorques, $X_\ell/\alpha_\ell F_\ell$, est faible comme le démontre le tableau IX, obtenu en calculant [1] les valeurs de $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ suivantes [2], à partir des résultats

---

1 La méthode utilisée pour calculer les valeurs de $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ est décrite dans Jabranne et Roy (1984).

2 Ces expressions de $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ sont tirées de Petersen (1971) dont le travail s'inspire des résultats obtenus auparavant par Downton (1955 et 1956) et Bailey (1954). Pour un exposé plus récent sur les modèles de file d'attente avec arrivées et service en lots, le lecteur intéressé pourra consulter le livre de Chaudhry et Templeton (1983) ainsi que les travaux de Powell (1981, 1982 et 1983).

TABLEAU IX

Valeurs de $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ en fonction de la capacité des remorques, α_ℓ, et de leur taux d'utilisation, $\rho = X_\ell/\alpha_\ell F_\ell$, pour des départs à toutes les 12 hres

$E(D_\ell)$ (en heures)						
α_ℓ	ρ=0.80	ρ=0.90	ρ=0.92	ρ=0.94	ρ=0.96	ρ=0.98
1	30.00	60.00	75.00	100.00	150.00	300.00
2	16.85	31.73	39.25	51.73	76.72	151.71
3	12.65	22.53	27.51	35.83	52.47	102.45
6	8.72	13.56	16.03	20.16	28.47	53.44
12	7.01	9.31	10.52	12.57	16.70	29.16
24	6.31	7.36	7.94	8.94	10.98	17.19
48	6.07	6.50	6.77	7.25	8.25	11.33
96	6.01	6.16	6.27	6.49	6.97	8.48
200	6.00	6.03	6.07	6.16	6.37	7.07
∞	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
$V(D_\ell)$ (en heures^2)						
α_ℓ	ρ=0.80	ρ=0.90	ρ=0.92	ρ=0.94	ρ=0.96	ρ=0.98
1	780.00	3360.00	5325.00	9600.00	21900.00	88800.00
2	200.25	844.25	1336.22	2404.94	5480.00	22197.50
3	93.83	380.25	598.52	1073.48	2440.10	9873.39
6	31.05	102.40	156.86	275.56	617.17	2475.45
12	16.04	33.60	47.27	76.90	162.26	626.79
24	12.74	17.00	20.35	27.72	49.03	165.12
48	12.10	13.06	13.88	15.69	20.99	49.99
96	12.01	12.19	12.38	12.82	14.12	21.35
200	12.00	12.02	12.06	12.15	12.44	14.08
∞	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00

présentés dans Petersen (1971) pour le cas où le temps de service est constant, i.e. un départ à toutes les 12 heures:

$$E(D_\ell) = \lambda^{-1} \{[1 - \alpha_\ell(1-\rho)]/2(1-\rho)] + \sum_{i=1}^{\alpha_\ell - 1} (1 - Z_i)^{-1}\}$$

$$V(D_\ell) = \lambda^{-2} \{\alpha_\ell(6 - \alpha_\ell + 2\rho\alpha_\ell)/12 - (5 - 8\rho)/12(1-\rho)^2 - \sum_{i=1}^{\alpha_\ell - 1} (1 - Z_i)^{-2}\}$$

où les Z_i représentent les $\alpha_\ell - 1$ racines à l'intérieur du cercle unitaire de:

$$Z^{\alpha_\ell} e^{\rho\alpha_\ell(1-z)} - 1 = 0$$

A partir des résultats présentés au tableau IX, on peut constater que l'erreur que l'on commet en supposant que la capacité est infinie ($\alpha_\ell = \infty$) augmente rapidement lorsque le taux d'utilisation ρ des remorques excède 0.80. Par conséquent, nous allons considérer trois cas pour le calcul des délais de fréquence et de leur variance. Le premier cas correspond à des valeurs de ρ inférieures à 0.80; on supposera alors une capacité infinie ($\alpha_\ell \to \infty$). Le deuxième cas correspond à des valeurs de ρ comprises entre 0.80 et 0.999; on devra alors tenir compte de la variation des délais de fréquence et de leur variance en fonction de ρ pour un α_ℓ donné. Dans le troisième cas, $\rho \geq 1$, on supposera tout simplement que les délais de fréquence et leur variance tendent vers l'infini.

1er cas: $\rho < 0{,}80$ et $\alpha_\ell \to \infty$

Sous ces conditions, nous pouvons utiliser les expressions suivantes tirées de Turnquist et Daskin (1982) pour les délais de fréquence espérés $E(D_\ell)$ ainsi que leur variance $V(D_\ell)$:

Soit H une variable aléatoire représentant l'intervalle de temps entre deux départs successifs de remorques.

Alors, $E(D_\ell) = E(H)/2 + V(H)/2E(H)$

$$V(D_\ell) = [E(H)]^2/12 + V(H)/2 - [V(H)/2E(H)]^2$$

Il est intéressant de noter que lorsque les départs de remorques ont lieu à intervalles réguliers (e.g. à toutes les 24 heures), les expressions de $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ se réduisent à $E(H)/2$ et $[E(H)]^2/12$; résultats également obtenus par Petersen (1971). Ce cas particulier se retrouve assez fréquemment dans le transport routier des marchandises. Il arrive cependant que le nombre de remorques prévues par période soit inférieur au nombre de jours par période. Ainsi, si la fréquence de service est de trois par semaine (i.e. $F_\ell = 3$) et que la période de planification retenue soit une semaine de cinq jours, alors ces trois départs seront fort probablement prévus à intervalles réguliers (e.g. les lundi, mercredi et vendredi soirs après la période de cueillette). Alors on aura:

$$E(H) = 1/3(12) + 2/3(36) = 28 \text{ (heures)}$$

$$V(H) = 1/3(12)^2 + 2/3(36)^2 - (28)^2 = 128 \text{ (heures}^2\text{)}$$

et, par conséquent, on obtient:

$$E(D_\ell) = 16.3 \text{ heures et } V(D_\ell) = 124.1 \text{ heures}^2.$$

Les valeurs de E(H), V(H), $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ sont présentées au tableau X pour le cas où la période de planification est de cinq jours et $\rho < 0.80$.

TABLEAU X

Valeurs de $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ lorsque $\rho < 0.80$

F_ℓ	E(H) (heures)	V(H) (heures^2)	$E(D_\ell)$ (heures)	$V(D_\ell)$ (heures^2)
1	108	0	54,0	972,0
2	48	144	25,5	261,7
3	28	128	16,3	124,1
4	18	108	12,0	72,0
5 et plus	12	0	6,0	12,0

Dans certains cas, il se peut que le délai de fréquence, D_ℓ, soit sensiblement inférieur aux valeurs présentées dans le tableau X. Cela se produira, par exemple, à un terminus de consolidation où les heures d'arrivée et de départ des remorques d'un itinéraire donné seront très bien synchronisées. Dans de tels cas, il s'agira tout simplement d'imposer une valeur constante au temps moyen de transit pour ces itinéraires.

2e cas: $0{,}80 \leq \rho < 1{,}00$ et $\alpha_\ell = 50$

Lorsque le taux d'utilisation ρ s'approche de l'unité, un examen du tableau IX nous indique que les valeurs de $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ varient sensiblement, et ce, même pour des valeurs de α_ℓ supérieures à 48. On doit donc tenir compte de ces variations dans notre modèle lorsque ρ est supérieur ou égal à 0,80. Pour ce faire, nous devons tout d'abord évaluer le poids moyen d'une expédition du type LTL et mesurer la capacité d'une remorque α_ℓ en terme du nombre d'expéditions pouvant y être chargées. En supposant, par exemple, un poids moyen de 500 livres par expédition et une capacité de 25 000 livres par remorque, on arrive à un α_ℓ de 50 expéditions par remorque. Le tableau XI nous donne les valeurs de $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ en fonction du taux d'utilisation ρ pour un α_ℓ égal à 50. Ces valeurs sont obtenues tout d'abord par calcul exact à l'aide des expressions suggérées par Petersen (1971) tout comme au tableau IX.

Puisqu'il n'est pas commode de résoudre des équations de ce type à l'intérieur d'un modèle d'optimisation, nous avons plutôt dérivé des expressions analytiques pour $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ à partir des résultats obtenus par calcul exact. Ces expressions ont la forme suivante:

$$E(D_\ell) = \text{EXP}[a/(1-\rho)^{1/3} - b]/\rho \times 12$$

$$V(D_\ell) = \text{EXP}[c/(1-\rho)^{1/3} - d]/\rho^2 \times 144$$

où a, b, c et d sont des constantes obtenues en résolvant les deux systèmes d'équations logarithmiques à deux inconnues correspondant aux expressions précédentes pour des valeurs de ρ de 0,80 et 0,98.

Ainsi, pour $\alpha_\ell = 50$, on obtient:

$a = 0.41$ $\quad$ $c = 0.89$

$b = 1.61$ $\quad$ $d = 4.45.$

TABLEAU XI

Valeurs réelles et approximatives de $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ en fonction du taux d'utilisation des remorques ρ pour $\alpha_\ell = 50$

	$E(D_\ell)$		$V(D_\ell)$	
ρ	Calcul exact[1]	Approximation[2]	Calcul exact[1]	Approximation[2]
0,80	6,06	6,04	12,04	12,03
0,90	6,47	6,44	12,96	14,15
0,92	6,73	6,75	13,71	15,67
0,94	7,19	7,27	15,38	18,55
0,96	8,14	8,28	20,26	24,62
0,98	11,09	11,08	46,98	46,92
1,00	∞	∞	∞	∞

1. Valeurs obtenues en résolvant les expressions de $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ suggérées par Petersen (1971).
2. Valeurs obtenues à l'aide d'une expression analytique et utilisées dans notre modèle comme approximation des valeurs réelles.

Résumé

On peut résumer ainsi les valeurs obtenues pour les délais de fréquence et leur variance. Tout d'abord, si le nombre de départs est inférieur au nombre de jours dans la période de planification (typiquement, pour $F_\ell < 5$) alors on doit recourir aux valeurs données dans le tableau X. Dans tous les autres cas, on suppose des départs réguliers, à tous les jours, et on obtient des valeurs de $E(D_\ell)$ et $V(D_\ell)$ qui varient en fonction du taux d'utilisation des remorques, ρ, comme suit:

$$E(D_\ell) = \begin{cases} E(H)/2 & \text{pour } \rho < 0.80 \\ \text{EXP}[a/(1-\rho)^{1/3} - b]/\rho \times 12 & \text{pour } 0.80 \leq \rho < 1.00 \\ \infty & \text{pour } \rho \geq 1.00 \end{cases}$$

$$V(D_\ell) = \begin{cases} [E(H)]^2/12 & \text{pour } \rho < 0.80 \\ \text{EXP}[c/(1-\rho)^{1/3} - d]/\rho^2 \times 144 & \text{pour } 0.80 \leq \rho < 1.00 \\ \infty & \text{pour } \rho \geq 1.00 \end{cases}$$

où $\rho = X_\ell/\alpha_\ell F_\ell$ et $E(H) = 12$ heures

3.4.2 Les temps de classification et leur variance

Le temps total de classification de la marchandise à un terminus donné, T_j^c, se compose du temps d'attente de la marchandise dans les

remorques avant le déchargement et du temps de déchargement et de classification. Avant d'obtenir des expressions analytiques pour ces temps, nous présentons la notation utilisée.

Notation

T_j^a : le temps d'attente de la marchandise dans les remorques avant le début du déchargement au terminus $j \in J$

T_j^d : le temps de déchargement et de classification de la marchandise au terminus $j \in J$

T_j^c : le temps total requis pour décharger et classifier la marchandise au terminus $j \in J$; incluant le temps d'attente avant le début du déchargement. $T_j^c = T_j^a + T_j^d$

N : le nombre d'heures de déchargement par semaine; e.g. N = 60 heures/semaine

λ_j : le taux d'arrivée des remorques au terminus $j \in J$, en remorques par heure

μ_j : le taux de service total au terminus $j \in J$, en remorques par heure

μ_j^r : le taux de déchargement et de classification des remorques au terminus $j \in J$, en cwt par heure

L_j^c : l'ensemble des services ℓ se rendant au terminus j; j étant soit un terminus de classification ou de destination pour la marchandise.

Le temps d'attente avant le déchargement

En supposant que les remorques intercité arrivent aux terminus de classification selon un processus Poisson (voir figure VI), et que les temps de service de déchargement suivent une loi exponentielle [1] avec une

---

1 Cette hypothèse est raisonnable compte tenu de la très grande variabilité des temps de déchargement observés en pratique.

moyenne μ_j^{-1}, on peut représenter le temps d'attente des marchandises dans les remorques avant le déchargement comme le temps d'attente dans une file M/M/1. On obtient alors les expressions suivantes pour les temps moyens d'attente de la marchandise dans les remorques, $E(T_j^a)$, et leur variance, $V(T_j^a)$, (Moder et Elmaghraby, 1978):

$$E(T_j^a) = \rho_j/\mu_j \ (1-\rho_j)$$

$$V(T_j^a) = \rho_j \ (2-\rho_j)/\mu_j^2 \ (1-\rho_j)^2$$

où $\rho_j = \lambda_j/\mu_j$

et $\lambda_j = \sum_{\ell \in L_j^c} F_\ell/N$

Remarque

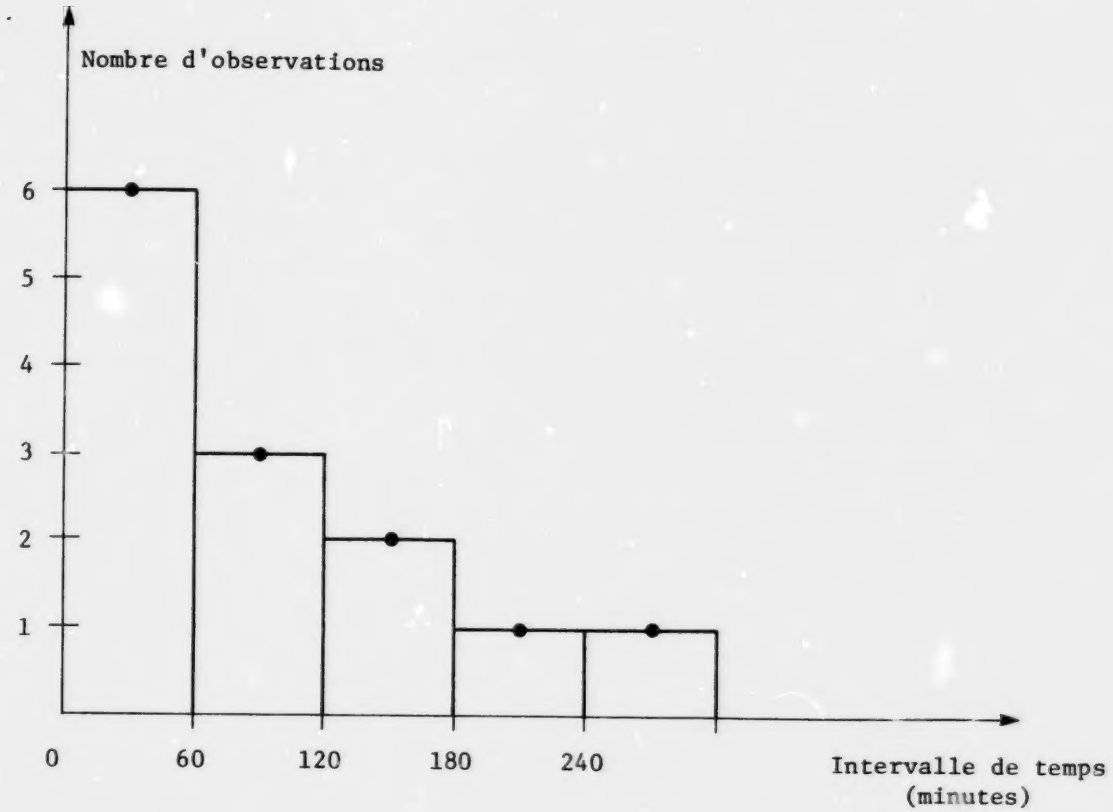
Le taux de service total μ_j étant un indicateur de la capacité du terminus j, il se trouve parfois exprimé en cwt/heure au lieu d'être en remorques/heure. Il s'agit alors de le transformer en le divisant par le nombre moyen de cwt par remorque arrivant au terminus j, dénoté X_j^r et obtenu de la façon suivante:

$$X_j^r = X_j^a/N\lambda_j = \sum_{\ell \in L_j^c} X_\ell/N\lambda_j$$

donc $X_j^r = \sum_{\ell \in L_j^c} X_\ell / \sum_{\ell \in L_j^c} F_\ell$

FIGURE VI

Histogramme du temps entre les arrivées de remorques
à un terminus typique



Note 1: Soit X = nombre d'arrivées/heure, alors E(X) = 0,916
V(X) = 0,909
Donc E(X) ≃ V(X).

Note 2: Soit Y = intervalle de temps entre deux arrivées,
alors E(Y) = 110 min
σ(Y) = 115 min.

où X_j^a est le nombre de cwt arrivant au terminus j pour y être classifiés durant la période de planification. Cela inclut la marchandise en transit (X_j^c) et celle destinée au terminus $j = D(m)$

$$X_j^a = \sum_{\ell \in L_j^c} X_\ell$$

et $$L_j^c = \{\ell \mid D(\ell) = j \text{ et } [j = D(m) \text{ ou } j \in J_{k_m}^c]\}, \quad \forall k_m \in K_m, \quad \forall m \in M.$$

Les temps de déchargement et de classification

La marchandise étant déchargée des remorques et classifiée à un taux exponentiel de μ_j^r cwt par heure, on obtient les expressions suivantes pour les temps moyens de déchargement et de classification, $E(T_j^d)$, et leur variance $V(T_j^d)$:

$$E(T_j^d) = X_j^r / 2\mu_j^r$$

$$V(T_j^d) = (X_j^r / 2\mu_j^r)^2$$

Le temps total de classification

Puisque $T_j^c = T_j^a + T_j^d$, on obtient:

$$E(T_j^c) = E(T_j^a) + E(T_j^d) = \rho_j / \mu_j (1 - \rho_j) + X_j^r / 2\mu_j^r$$

$$V(T_j^c) = V(T_j^a) + V(T_j^d) + 2 \text{ Cov } (T_j^a, T_j^d)$$

où Cov (T_j^a, T_j^d), la covariance de T_j^a et T_j^d est négligée pour fins de simplification des calculs. On sous-estime ainsi la valeur de $V(T_j^c)$

mais notre expérience nous porte à croire qu'une telle simplification n'affectera pas sérieusement les résultats obtenus à l'aide de notre modèle. Bref, en posant Cov $(T_j^a, T_j^d) = 0$, on obtient:

$$V(T_j^c) = V(T_j^a) + V(T_j^d) = \rho_j \ (2 - \rho_j)/\mu_j^2 \ (1 - \rho_j)^2 + (X_j^r/2\mu_j^r)^2$$

3.4.3 Les temps de manutention à destination et leur variance

La marchandise arrivant à destination est souvent accompagnée d'expéditions devant être déchargées et classées pour d'autres destinations. C'est pourquoi on doit tenir compte de ces deux types de trafic lorsque l'on calcule les temps de manutention. C'est d'ailleurs l'approche qui fut employée à la section précédente et c'est donc le même type de modèle qui sera utilisé dans ce cas-ci.

On utilisera donc les expressions de $E(T_j^c)$ et $V(T_j^c)$ obtenues à la section précédente en posant $j = D(m)$.

3.5 Le modèle

On veut trouver les valeurs de x_{k_m} et F_ℓ qui minimisent le coût total (C.T.) de la fonction suivante:

$$\text{Minimiser C.T.} = \sum_{\ell \in L} C_\ell F_\ell \qquad \text{(coûts de transport intercité)}$$

$$+ \sum_{j \in J} C_j^c X_j^c \qquad \text{(coûts de manutention dans les terminus de consolidation)}$$

$$+ \sum_{m \in M} \sum_{k_m \in K_m} C_m x_{k_m} \{\min[0, S_m - E(T_{k_m}) - n\sigma(T_{k_m})]\}^2$$

(coûts de pénalité de service)

sujet à:

1) contraintes de demande: $\sum_{k_m \in K_m} x_{k_m} = d_m \qquad \forall m \in M$

2) contraintes de capacité: $X_\ell \leq a_\ell F_\ell \qquad \forall \ell \in L$

$$F_\ell \leq E_\ell$$

3) non-négativité des variables: $x_{k_m} \geq 0 \qquad \forall k_m \in K_m \text{ et } \forall m \in M$

$$F_\ell \geq 0 \text{ et entier } \forall \ell \in L.$$

et où la valeur de n peut être obtenue en fonction de la fiabilité P_m requise selon deux cas: 1) le cas général où la distribution du temps de transit T_{k_m} n'est pas connue et 2) le cas normal où T_{k_m} suit une distribution normale.

Discussion-contraintes de capacité

Telles que modélisées, les contraintes de capacité visent à obtenir des valeurs de F_ℓ suffisamment grandes pour permettre le transport de toutes les marchandises, sur tous les services, pour la période de planification considérée. Ceci ne garantit pas, toutefois, que la capacité de transport sera suffisante à chaque départ pour transporter toute la marchandise présente sur les quais de chargement.

En fait, il est commun dans l'industrie du camionnage que la demande varie, et ce, de façon très sensible, d'une journée à l'autre. Alors, en supposant que la demande hebdomadaire soit équivalente à la capacité de neuf remorques, il n'est pas certain qu'une fréquence de service de dix remorques par semaine garantisse qu'aucune marchandise ne sera laissée sur les quais de chargement. En réalité, il est fort probable que, pour une journée, la demande excède la capacité disponible.

Lors du calcul des délais de fréquence, on a tenu compte de ce facteur. Les contraintes de capacité, telles que modélisées, ne tiennent cependant pas compte de la variabilité de la demande et on préférera les remplacer par un nouveau terme, dans notre fonction objectif, reflétant les coûts associés à un coefficient d'utilisation de la capacité trop élevé. Ce nouveau coût sera donc une fonction croissante du coefficient $X_\ell/\alpha_\ell F_\ell$.

Soit C_ℓ^α : le coût de pénalité, (en \$/cwt), associé à un dépassement de capacité sur le service ℓ (à déterminer empiriquement.

Alors, l'expression suivante nous donne le coût total de pénalité pour dépassement de capacité, dans le cas particulier où nous désirons que le taux d'utilisation de nos remorques ne dépasse pas 90%:

$$\sum_{\ell \in L} C_\ell^\alpha X_\ell \{\min [0, 9 - 10X_\ell/\alpha_\ell F_\ell]^2\}$$

Lorsque C_ℓ^α est très grand, on est ainsi assuré que le taux d'utilisation $X_\ell/\alpha_\ell F_\ell$ ne dépassera pas 90% de la capacité totale disponible. Il est à noter que l'on peut facilement modifier les paramètres de cette expression pour s'adapter à différentes stratégies possibles ou encore à la volonté des dirigeants de l'entreprise.

3.6 Le problème du retour à vide des remorques

Le retour à vide des remorques est un problème important dans le transport routier des marchandises. En effet, il est très rare que tous les terminus reçoivent autant de remorques qu'ils en envoient. Certains terminus, comme ceux situés dans les grands centres industriels, expédient beaucoup plus de marchandises qu'il n'en reçoivent. Ce déséquilibre engendre le besoin de retourner à un point d'origine des remorques vides qui évidemment ne rapportent pas de revenus.

Pour résoudre ce problème, une pratique courante de l'industrie consiste à solliciter des chargements complets ("Truckloads") pour le voyage du retour de façon à obtenir au moins suffisamment de revenus pour couvrir les dépenses du voyage. Malheureusement, cette pratique ne suf-

fit pas toujours à résoudre le problème car le déséquilibre des routes est un problème de disparité régionale qui affecte normalement tous les transporteurs; ce qui a pour effet que la compétition est généralement très forte pour solliciter ce genre de fret. De plus, on ne réussit pas nécessairement toujours à obtenir un "voyage de retour" dans des délais suffisants pour combler le déficit de remorques sévissant aux terminus "expéditeurs". Ceci a pour effet d'engendrer une accumulation de remorques aux terminus "receveurs" et un déficit grandissant de remorques aux terminus "expéditeurs". On doit donc se résigner tôt ou tard à retourner à vide les remorques vers les terminus déficitaires.

A l'aide de notre modèle, on peut déterminer "l'offre et la demande" de remorques pour chaque terminus du réseau, une fois que l'on connaît la valeur des variables F_ℓ. On peut donc, dans un deuxième temps, rééquilibrer le système en retournant les remorques à vide selon un cheminement optimal en utilisant, par exemple, l'algorithme du transport. C'est d'ailleurs l'approche proposée par Barker et al. (1981) dans leur "Freight Flow Model".

Jusqu'à présent, l'approche suggérée pour résoudre le problème de retour à vide des remorques consiste en deux phases: 1) solliciter des chargements complets, puis 2) déterminer le cheminement optimal des remorques vides. Cependant, en utilisant notre modèle de planification globale, on peut connaître à l'avance l'ampleur du problème de déséquilibre des remorques et l'atténuer en 1) éliminant les fréquences engendrant des déséquilibres et/ou 2) en utilisant les surplus de remorques pour créer de nouveaux services, moins coûteux, afin d'améliorer le niveau de service.

Dans les deux cas, la solution retenue sera celle qui minimise le coût total, incluant les pénalités de service et de dépassement de capacité. Bref, notre modèle de planification nous permet d'aborder le problème du retour à vide des remorques en tenant compte des compromis à faire entre la minimisation des coûts d'opération et la recherche d'un service rapide et fiable. Pour ce faire, la nouvelle approche suivante est suggérée:

1) déterminer l'équipement disponible à chaque terminus au début de la période (ceci est connu);

2) déterminer le plan d'opérations à l'aide du modèle. Est-il meilleur que le plan précédent? (Si oui, continuer à (3), sinon arrêter);

3) déterminer les surplus/déficits par catégorie d'équipement, à chaque terminus;

4) ajuster (3) à l'aide des prévisions de ventes de chargements complets;

5) éliminer et/ou ajouter les fréquences nécessaires pour équilibrer le réseau en fonction du coût total, et retourner à (2).

3.7 Conclusions

Le modèle proposé dans ce chapitre peut s'avérer très utile pour aider les gestionnaires à améliorer la planification globale des opérations de transport routier des marchandises en lots brisés. Pour la première fois, à notre connaissance, on a présenté une formulation d'un modèle d'optimisation permettant d'obtenir des solutions de compromis en-

tre la minimisation des coûts d'opération et la recherche d'un service rapide et fiable. Voyons maintenant comment notre modèle se compare à ceux présentés au chapitre 2, particulièrement à ceux de Powell et Sheffi et de Crainic.

Dans sa formulation actuelle, le modèle proposé par Powell et Sheffi comporte quelques carences que nous avons relevées au chapitre 2 et que nous rappelons ici brièvement: 1) les fréquences de service ne sont pas traitées comme des variables décisionnelles mais découlent plutôt des décisions prises au niveau des itinéraires retenus, 2) on ne tient pas compte des phénomènes de congestion dans les terminus de consolidation, 3) des temps de transit déterministes sont utilisés comme critères de service dans la formulation originale du modèle et 4) on néglige complètement les normes de service requises dans la reformulation simplifiée du modèle utilisée pour fins d'expérimentation. Ces carences sont absentes du modèle proposé dans cette thèse. Nous avons correctement défini les fréquences de service F_ℓ comme des variables décisionnelles en nombre entier. Nous avons également apporté beaucoup de soin à la modélisation des phénomènes de files d'attente se manifestant dans les terminus et surtout, nous considérons les temps de transit T_{k_m} comme des variables aléatoires, ce qui nous permet d'évaluer convenablement la rapidité et la fiabilité des itinéraires proposés par notre modèle et de pénaliser ceux qui ne satisfont pas les normes de service désirées.

Même s'il s'adresse plus spécifiquement au transport ferroviaire des marchandises, le modèle de Crainic (1982) est celui dont la philoso-

phie a le plus inspiré le modèle proposé dans cette thèse. En particulier, nous avons adapté au contexte du camionnage les notions de "service" et "d'itinéraire" proposées par Crainic ainsi que les deux types de variables décisionnelles F_ℓ et x_{k_m} en découlant. Nous avons également opté, à l'instar de Crainic, pour le remplacement des contraintes de capacité par des coûts de pénalité pour dépassement de capacité au niveau de la fonction objectif. Par contre, le modèle de Crainic comprend des éléments propres aux opérations de transport ferroviaire tels la formation de blocs de wagons ayant la même destination, la congestion sur les voies ferrées en fonction de la priorité accordée aux trains ainsi que les délais engendrés par des arrêts de trains aux gares pour des motifs autres que la classification des wagons.

Notre modèle comporte également des particularités telles la possibilité d'utiliser plusieurs modes de transport, dont le mode intermodal ou rail-route, ainsi que la nécessité d'aborder au niveau de la planification tactique l'épineux problème du retour à vide des remorques. De plus, notre formulation du modèle proposé dans cette thèse est la première, à notre connaissance, à tenir compte de la fiabilité du temps de transit des marchandises, critère jugé essentiel par la plupart des expéditeurs selon les résultats d'enquêtes présentés au chapitre 1. En effet, le modèle de Crainic ne tient compte que du délai encouru par la marchandise en lui affectant un coût de pénalité en fonction du nombre total d'heures-wagons et d'heures-trains obtenus, sans autre référence à la rapidité ou à la fiabilité du service requis pour chacun des marchés desservis.

Dans le prochain chapitre, on décrira les méthodes utilisées pour résoudre le problème test sur lequel nous avons expérimenté notre modèle. Par la suite, nous procéderons à plusieurs analyses de sensibilité pour mieux vérifier et apprécier l'utilité de notre modèle.

CHAPITRE 4

Résolution et expérimentation du modèle

Ce chapitre décrit tout d'abord les méthodes utilisées pour résoudre le problème tel que formulé précédemment. L'algorithme proposé s'inspire de la méthodologie développée par Crainic (1982) en adoptant une approche de décomposition qui tient compte de la structure particulière du modèle et de la grande taille du problème. Cet algorithme est ensuite testé sur des données réelles provenant de la division de Messageries du Canadien National (CNX) qui opère un réseau d'une trentaine de terminus, d'un océan à l'autre. On examine ensuite la question de la validité du modèle pour terminer avec une analyse des résultats obtenus.

4.1 Méthodes de résolution

Le modèle proposé au chapitre 3 possède une structure particulière dont nous allons tirer profit. Tout d'abord, en remplaçant les contraintes de capacité par des coûts de pénalité au niveau de la fonction objectif, on constate qu'il ne reste plus, au niveau des contraintes, que des variables continues du type x_{k_m}. C'est donc uniquement au niveau de la fonction objectif que s'établissent les relations entre les variables x_{k_m} distribuant le fret de chaque marché sur les itinéraires retenus et les variables F_ℓ représentant la fréquence des services utilisés par les marchandises empruntant ces mêmes itinéraires. Une version abrégée du modèle est présentée ci-dessous:

Minimiser $Z(x_{k_m}, F_\ell) = T(F_\ell)$ (coûts de transport intercité)

$+ M(x_{k_m})$ (coûts de manutention dans les terminus de consolidation)

$+ S(x_{k_m}, F_\ell)$ (coûts de pénalité de service)

$+ C(x_{k_m}, F_\ell)$ (coûts de pénalité pour dépassement de capacité)

sujet à:

1) contraintes de demande: $\sum_{k_m \in K_m} x_{k_m} = d_m \qquad \forall m \in M$

2) non-négativité et bornes des variables:

$$x_{k_m} \geq 0 \qquad \forall k_m \in K_m \text{ et } \forall m \in M$$

$$F_\ell \geq 0 \text{ et entier} \qquad \forall \ell \in L$$

$$F_\ell \leq E_\ell$$

Compte tenu de cette structure particulière du modèle et de la grande taille du problème, nous adoptons une approche de décomposition qui agit alternativement sur les sous-problèmes suivants:

1) <u>Détermination des fréquences de services</u>

Etant donnée la distribution du fret sur les itinéraires, i.e. les variables x_{k_m} étant fixées, on modifie les fréquences de service, i.e. les variables F_ℓ, de façon à améliorer, si possible, la fonction objectif.

2) Distribution du fret

Les fréquences de service étant fixées, on établit la distribution optimale des marchandises sur les itinéraires retenus pour chaque marché.

La procédure se termine lorsqu'on ne peut plus apporter d'améliorations sensibles à la fonction objectif en modifiant les fréquences de service. On s'attaque alors au problème du déséquilibre du réseau en cherchant à rétablir l'équilibre entre le nombre de départs et d'arrivées de remorques, à chaque terminus du réseau. Nous présentons maintenant une description plus détaillée des méthodes de solution utilisées.

4.1.1 Détermination des fréquences de service

Au début, toutes les fréquences de service sont fixées à une valeur relativement grande de telle sorte que chaque service peut accomoder tout le fret pouvant lui être affecté. Ensuite, à chaque itération, on doit déterminer s'il est possible d'améliorer la valeur de la fonction objectif en modifiant les fréquences de service, F_ℓ. Pour ce faire, tout en maintenant entières les valeurs des fréquences de service, on modifie les variables F_ℓ d'un pas entier Δ. De plus, pour simplifier une procédure qui revient très fréquemment dans la résolution de problèmes de grande taille, on évalue l'impact sur la fonction objectif d'une modification de fréquence pour un seul service ℓ à la fois. Cette évaluation est obtenue en calculant la différence finie $\pi_\ell(\Delta)$ pour une distribution du fret $\overline{x_{k_m}}$ connue:

$$\pi_{\ell}(\Delta) = Z(\overline{x_{k_m}}, F_1, \ldots, F_{\ell-1}, F_{\ell}, F_{\ell+1}, \ldots, F_{|L|})$$

$$- Z(\overline{x_{k_m}}, F_1, \ldots, F_{\ell-1}, F_{\ell}-\Delta, F_{\ell+1}, \ldots, F_{|L|}).$$

Les fréquences de service sont ensuite modifiées en suivant la procédure suivante:

1) calculer $\pi_{\ell}(\Delta)$, pour tout $\ell \in L$;

2) ordonnancer tous les services, ℓ, pour lesquels $\pi_{\ell}(\Delta) > 0$ par ordre décroissant de la valeur de $\pi_{\ell}(\Delta)$ correspondante;

3) modifier les n premiers services, ℓ, comme suit:

$$F_{\ell} = F_{\ell} - \Delta$$

où n et Δ sont des nombres entiers pré-déterminés.

La détermination de n et Δ

La détermination du pas, Δ, est une question de compromis entre la rapidité d'exécution reliée à l'utilisation d'un Δ élevé et la plus grande précision obtenue en employant un pas plus petit, idéalement égal à ± 1. On a donc choisi la stratégie suivante: au départ, les valeurs de Δ sont relativement grandes, puis elles diminuent progressivement pour atteindre ± 1 à la fin du processus. De cette façon, l'algorithme converge rapidement, au début, sans perte sensible d'exactitude car toutes les fréquences sont fixées à un niveau très élevé tandis que vers la fin, l'utilisation de pas plus petits nous permet d'obtenir

une solution très satisfaisante en terme de coût total. On notera également que, vers la fin du processus, lorsqu'il n'est plus possible d'améliorer la fonction objectif en réduisant les fréquences de service, i.e. avec un pas $\Delta = 1$, on fixe la valeur de Δ à -1 afin de déterminer si des services éliminés plus tôt dans le processus ne sont pas devenus attrayants à ce stage-ci de la procédure. On alterne ainsi la valeur de Δ de +1 à -1 jusqu'à ce que les améliorations obtenues dans la valeur de la fonction objectif soient inférieures à un certain ε prédéterminé.

La détermination de n, le nombre de services à modifier à chaque itération, est également une question de compromis. En effet, on pourrait évidemment modifier la fréquence de tous les services ℓ, dont la différence finie, $\pi_\ell(\Delta)$, est positive; ce qui contribuerait à accélérer la diminution des fréquences mais, en même temps, risquerait de nous éloigner de la solution optimale à cause de l'effet incertain de la réduction de fréquences de services faisant partie de mêmes itinéraires sur la fonction objectif.

A titre d'exemple, supposons que les deux services 101 et 102, se trouvant sur le même itinéraire, aient des différences finies respectives, $\pi_{101}(1)$ et $\pi_{102}(1)$, de 75 et 25 dollars. On pourrait donc croire que la réduction d'une fréquence ($\Delta = 1$) de chacun de ces services entraînera une amélioration de la fonction objectif de 100 dollars. Cependant, les différences finies ayant été calculées pour des modifications apportées à un service à la fois, il est possible que l'effet combiné de la ré-

duction de fréquence des deux services soit inférieur à 100 dollars, soit $\pi_{101}(1) + \pi_{102}(1)$, à cause, entre autres, de l'augmentation non-linéaire des coûts de pénalité associés à un service inadéquat. En effet, une réduction dans les fréquences de service risque d'entraîner une augmentation des délais de fréquence dont les effets combinés sur plusieurs services d'un même itinéraire peuvent engendrer des coûts de pénalité sensiblement supérieurs à ce qui pourrait être prévu par le calcul des différences finies.

Pour éviter de vérifier, à chaque itération, les effets combinés de la réduction de fréquence de services appartenant à des itinéraires communs, on limite le nombre de services modifiés, à chaque étape, à un maximum de "n" services à la fois, où n est déterminé empiriquement. Il est intéressant de noter cependant que lorsque l'on ne modifie que les fréquences de services n'appartenant pas à des itinéraires communs, alors leurs différences finies, $\pi_{\ell}(\Delta)$, constituent des bornes inférieures aux améliorations potentielles de la fonction objectif (Crainic et Rousseau, 1984) car on pourra souvent apporter d'autres améliorations à la fonction objectif en redistribuant le fret, i.e. en réoptimisant les variables x_{k_m}. C'est d'ailleurs cette procédure que nous allons maintenant examiner.

4.1.2 Distribution du fret

Une fois que les fréquences de service, F_{ℓ}, ont été fixées suivant la procédure décrite à la section précédente, le problème à résoudre,

soit la distribution optimale du fret, peut s'écrire comme suit:

$$\text{Minimiser } Z(x_{k_m}, \bar{F}_\ell)$$

sujet à:

$$\sum_{k_m \in K_m} x_{k_m} = d_m \qquad \forall\, m \in M$$

et

$$x_{k_m} \geq 0 \qquad \forall\, k_m \in K_m \text{ et } \forall\, m \in M.$$

Puisque les contraintes correspondent à chacun des marchés $m \in M$ et qu'elles sont linéairement indépendantes, on peut résoudre ce problème à l'aide d'un algorithme de décomposition proposé par Crainic (1982). Chaque sous-problème correspond à un seul marché et est résolu de façon cyclique en maintenant fixes les valeurs des variables x_{k_m} associées aux autres marchés. La procédure (Crainic et Rousseau, 1984) peut être décrite de la façon suivante:

A. Pour chaque $m \in M$,

   (1) fixer les autres variables x_{k_t} à leur valeur courante, $t \neq m$;

   (2) générer k_m, le meilleur itinéraire pour le marché m compte tenu des conditions actuelles;

(3) ajouter k_m aux autres itinéraires du marché m, i.e. si $\{k_m\} \notin K_m$, alors $K_m = K_m \cup \{k_m\}$;

(4) résoudre le nouveau sous-problème suivant:

$$\text{Minimiser } Z(\overline{x_{k_t}}, x_{k_m}, \overline{F_\ell})$$

sujet à:

$$\sum_{k_m \in K_m} x_{k_m} = d_m$$

et

$$x_{k_m} \geq 0, \quad \forall k_m \in K_m.$$

B. Après chaque cycle, si les conditions d'optimalité de Kuhn-Tucker de chaque sous-problème sont satisfaites, à une faible valeur ε près, alors arrêter. Sinon, recommencer un nouveau cycle.

Autrement dit, on arrête lorsque, pour tout m et pour un petit nombre $\varepsilon \geq 0$,

$$\left| \underset{x_{k_m} > 0}{\text{maximum}} \left\{ \frac{\partial Z(x_{k_m}, \bar{F}_\ell)}{\partial x_{k_m}} \right\} - \underset{x_{k_m} > 0}{\text{minimum}} \left\{ \frac{\partial Z(x_{k_m}, \bar{F}_\ell)}{\partial x_{k_m}} \right\} \right| < \varepsilon$$

et

$$\underset{x_{k_m} = 0}{\text{minimum}} \left\{ \frac{\partial Z(x_{k_m}, \bar{F}_\ell)}{\partial x_{k_m}} \right\} - \underset{x_{k_m} > 0}{\text{maximum}} \left\{ \frac{\partial Z(x_{k_m}, \bar{F}_\ell)}{\partial x_{k_m}} \right\} > \varepsilon$$

Pour résoudre le sous-problème formulé à l'étape (4), on peut avoir recours à diverses méthodes de descente (Bazaraa et Shetty, 1979). La méthode spécifique que nous avons utilisée est celle du gradient décrite dans Crainic (1982).

En ce qui concerne la génération d'itinéraires, à l'étape (2), la procédure suivie s'inspire également de celle proposée par Crainic (1982). Il s'agit de trouver le meilleur itinéraire, en terme de coût total, pour un marché donné compte tenu de la valeur des autres variables x_{k_m} ainsi que des fréquences de service, F_ℓ, déterminées précédemment. Il s'agit donc d'un problème qui s'apparente à celui de trouver le "chemin le plus court" dans un réseau et pour lequel des algorithmes de solution sont connus (Crainic et Rousseau, 1984). Dans notre cas particulier, les distances sont remplacées par des coûts moyens par cwt reliés aux différents éléments du réseau de la façon suivante:

1) <u>Coûts sur les arcs</u> (spécifiques à chaque service):
   - . coût moyen de transport par cwt
   - . coût moyen de pénalité associé au délai de fréquence
   - . coût moyen de pénalité pour dépassement de capacité
   - . coût moyen de pénalité associé au temps de transit.

2) <u>Coûts aux noeuds</u> (spécifiques à chaque terminus):
   - . coût moyen de classification par cwt
   - . coût moyen de pénalité associé au temps de classification de la marchandise.

Tous ces coûts sont établis en fonction de ceux encourus par la dernière unité de fret ayant utilisé les différents éléments (arcs et noeuds) composant l'itinéraire recherché, c'est-à-dire le moins coûteux.

Enfin, l'absence de propriétés mathématiques nécessaires (e.g. stricte convexité) au niveau de la fonction objectif ne nous permet pas de décrire en termes d'optimalité une solution obtenue à l'aide de l'algorithme que nous venons de proposer. Cependant, la solution obtenue est telle que 1) tous les sous-problèmes de distribution du fret sont optimaux, à ε près, et 2) aucune modification de fréquence ne peut diminuer sensiblement la valeur de la fonction objectif.

4.1.3 Le rééquilibrage du réseau

Le rééquilibrage du réseau signifie qu'il faut maintenant rétablir l'équilibre qui existait, avant la détermination des fréquences de service, entre le nombre de remorques quittant et celui arrivant à chacun des terminus du réseau. Il s'agit d'une étape extrêmement importante dans le processus de planification globale car elle nous permet de prévoir, quelques mois d'avance, quelle sera la nature du déséquilibre engendré par l'application du plan d'opération obtenu précédemment.

Il est important de noter ici qu'une entreprise de transport qui connaît à l'avance la nature du déséquilibre qu'elle devra corriger dans quelques mois pourra mieux s'y préparer en prévoyant des stratégies visant à éviter le retour à vide, donc sans revenus, de remorques vers les

terminus déficitaires. Parmi les stratégies possibles pour éviter les coûts additionnels reliés au déséquilibre des remorques, une entreprise pourrait décider, par exemple, de réexaminer la justesse d'expédier des remorques qui engendrent des déséquilibres en révisant la rentabilité de tels services. On pourrait également tenter d'éviter le retour à vide de remorques vers les terminus déficitaires en sollicitant, à prix réduit, des "voyages de retour" pour absorber une partie des coûts engendrés par le rééquilibrage du réseau. C'est dans cet esprit que l'algorithme suivant de rééquilibrage du réseau a été conçu et qu'il est présenté:

1) A l'aide du modèle de planification globale, déterminer les fréquences de service requises pour desservir la demande prévue pour une période donnée.

2) Déterminer les surplus/déficits de remorques, par catégorie d'équipement, à chaque terminus $j \in J$ du réseau, pour la période de planification. Ainsi, par exemple, on calcule comme suit le surplus d'équipement de type $v(\ell) = 1$, pour tout $j \in J$:

$$\text{Surplus } (j,1) = \sum_{L^+_{j,1}} F_\ell - \sum_{L^-_{j,1}} F_\ell$$

où $L^+_{j,1} = \{\ell \mid v(\ell) = 1 \text{ et } D(\ell) = j\}$

$L^-_{j,1} = \{\ell \mid v(\ell) = 1 \text{ et } O(\ell) = j\}$.

3) Ajuster (2) à l'aide des prévisions de ventes de chargements complets, incluant les "voyages de retour", pour la période de planification.

4) Eliminer et/ou ajouter les fréquences de service nécessaires pour rééquilibrer le réseau tout en minimisant le coût total à l'aide d'un algorithme du transport adapté à ce problème et fonctionnant comme suit:

(i) calculer les coûts marginaux associés à des modifications unitaires de fréquences de service; ce qui revient à calculer les différences finies $\pi_{\ell}(+1)$ et $\pi_{\ell}(-1)$ pour tout $\ell \in L$;

(ii) utiliser les coûts obtenus en (i) comme coûts de transport afin d'éliminer un certain nombre prédéterminé, λ, de déséquilibres à l'aide de l'algorithme du transport;

(iii) réoptimiser la distribution du fret, i.e. les variables x_{k_m}, suivant l'algorithme décrit à la section 4.1.2;

(iv) recommencer à l'étape (i) jusqu'à ce que tous les terminus soient rééquilibrés.

Il est intéressant de noter que cet algorithme possède suffisamment de flexibilité pour tenir compte des prévisions de ventes de chargement complet et des compromis à faire entre un temps d'exécution rapide, en posant λ égal au nombre total de déséquilibres à corriger à l'étape (4 (ii)), et une plus grande amélioration de la fonction objectif en réoptimisant la distribution du fret plus souvent dans le processus de rééquilibrage du réseau, i.e. avec un λ plus petit.

4.2 Expérimentation

Le modèle de planification ainsi que les algorithmes de solution proposés dans cette thèse ont été expérimentés à l'aide de données réelles provenant de la division des Messageries du C.N. (ou CNX), pour le mois d'octobre 1982. Cette compagnie gérait à l'époque un réseau de 34 terminus desservant un total de 959 marchés, d'un océan à l'autre, en ayant recours à 289 services différents. Il s'agit donc d'un problème d'envergure nationale dont la grande taille, à elle seule, rend extrêmement difficile la mise à jour du plan global de transport pour s'adapter aux variations saisonnières dans la demande. Dans cette section, nous décrivons tout d'abord la nature et la source des données utilisées pour ensuite relater notre expérience avec l'utilisation de quelques stratégies visant à améliorer l'efficacité de l'algorithme de solution. Nous présentons enfin une analyse des résultats obtenus.

4.2.1 Les données du problème-test

Les données sur les marchés

On dispose des données suivantes pour chacun des 959 marchés pour le mois d'octobre 1982: l'origine et la destination des marchandises, le nombre d'expéditions, le poids total (en livres), le nombre de pièces et le revenu total. La demande d_m a été calculée en divisant le poids total par 400 pour obtenir le nombre moyen de cwt à transporter, pour chaque marché, durant une période typique de cinq jours, en octobre 1982. On pose donc l'hypothèse que la demande est constante pour

les quatre semaines d'octobre, ce qui est acceptable compte tenu du niveau de planification et de la taille de l'entreprise.

La compagnie CNX nous a également fourni la matrice des normes de service, i.e. du temps de transit S_m désirés ainsi que la fiabilité P_m requise pour tous les marchés desservis. Quant aux coûts de pénalité de service C_m, ils ont été estimés en prenant, pour chaque marché, une marge équivalent à cinq pour cent du revenu par cwt, soit approximativement la moyenne de profit brut pour l'industrie, et en divisant ce montant par le carré de la norme de service, S_m, exprimée en heures; une telle estimation de C_m a été jugée satisfaisante par les dirigeants de la compagnie.

Le réseau de services

Le réseau de services est composé de tous les services utilisés par CNX en octobre 1982. La très grande majorité des données concernant le réseau de services ont été obtenues à partir de rapports produits par les systèmes d'information TRACE ("Traffic Reporting And Control for Express") et TLTP ("Traffic Lane and Terminal Profitability") de CNX. Ainsi, on a créé un fichier contenant les informations suivantes, pour chaque service: l'origine et la destination du service, le mode de transport utilisé, le coût unitaire (C_ℓ), la distance parcourue (en milles), le temps de transit moyen observé et la capacité (en cwt) du service.

Les modes de transport utilisés par la compagnie CNX, en octobre 1982, sont décrits au tableau XII. Il est bon de noter que, pour le problème du rééquilibrage du réseau, seuls les modes $v = 1, 2, 3$ et 4 sont

considérés car dans tous les autres cas, la compagnie n'est pas responsable du retour de l'équipement utilisé pour le transport des marchandises. Quant aux autres données reliées aux services, elles sont obtenues explicitement à partir des rapports de la compagnie, sauf dans le cas de la capacité qui est déterminée de la façon décrite à la sous-section suivante.

TABLEAU XII

Les modes de transport utilisés par la compagnie CNX

Mode	Description
v = 1	Transport routier (tracteur et remorques) effectué par la compagnie CNX
v = 2	Transport routier sous-traité à des contracteurs
v = 3	Remorques de 27' transportées par rail
v = 4	Remorques de 40' à 45' transportées par rail
v = 6	Conteneurs transportés par rail
v = 7	Transport des marchandises par wagons de chemin de fer
v = 20	La compagnie CNX n'est pas responsable du retour des remorques transportées par la route
v = 40	La compagnie CNX n'est pas responsable du retour des remorques transportées par rail

La capacité des services

Plusieurs types de remorques peuvent être utilisés pour le transport de marchandises, et ce, même pour un seul mode v de transport. Il est donc difficile de déterminer la capacité d'un service α_ℓ, car celle-ci dépend à la fois du type d'équipement utilisé et de la densité moyenne de la marchandise empruntant le service ℓ. Voici donc la procédure que nous avons suivie pour les différents modes de transport utilisés.

a) Pour v = 1, 2, 4, 20 et 40

Pour contourner le problème de la diversité d'équipement utilisé, la compagnie CNX se sert du concept de "remorque équivalente" ayant une capacité de 2850 pieds cube, comme unité de mesure pour planifier ses besoins d'équipement et en contrôler l'utilisation. Ce concept n'est pas nouveau; il s'apparente à celui des "unités équivalentes" à produire utilisé pour la planification globale, en gestion de la production (Benedetti, 1980). Notons qu'en octobre 1982, il y a eu 5574 déplacements de remorques contre 5645 déplacements de "remorques équivalentes", soit une différence relative d'environ 1.3% par rapport au nombre réel de déplacements.

De plus, puisque les équipements de transport sont rarement chargés à pleine capacité (à cause du chargement progressif des remorques), on considère une remorque pleine lorsqu'elle est chargée à 80% de sa capacité physique. Alors, un "chargement équivalent" est donc défini comme un chargement occupant environ 2300 pieds cubes. Etant donné que la marchandise générale transportée par la compagnie CNX est ré-

putée avoir une densité minimale de 10 lbs/pi.cu., alors le "chargement équivalent" minimal sera de 23,000 lbs ou 230 cwt.

On peut cependant raffiner la définition de la capacité α_ℓ d'un service en observant la densité moyenne des marchandises transportées sur ce même service durant une période donnée, e.g. un mois. On obtient ainsi une capacité α_ℓ ajustée à la hausse pour tenir compte de la densité observée de la marchandise circulant sur chaque service. Alors, pour tout service ℓ utilisant les modes v = 1, 2, 4, 20 et 40, on a:

$$\alpha_\ell = \max (230, 23 \times \text{densité moyenne})$$

où la densité moyenne est exprimée en lbs/pi.cu. et α_ℓ en cwt.

Cet ajustement de la capacité en fonction de la densité est d'autant plus pertinent que l'on a observé des différences significatives entre la densité moyenne des marchandises en fonction de leur terminus d'origine. Mais, en même temps, un examen des données historiques par terminus, nous a permis de constater que la densité moyenne des marchandises quittant un même terminus était relativement constante dans le temps. D'où l'intérêt de définir une capacité spécifique à chaque service et, par conséquent, propre à chaque terminus d'origine.

b) Pour v = 3

La capacité des remorques de 27 pieds utilisées par CNX varie de 1220 pieds cubes à 1920 pieds cubes. La capacité d'une "remorque équivalente" de 27 pieds a été fixée à 1740 pieds cubes; ce qui

nous donne un "chargement équivalent" minimal d'environ 140 cwt, après un ajustement de 80% pour tenir compte du chargement progressif des remorques. Alors, pour tout service ℓ utilisant le mode v = 3, on a:

$$\alpha_\ell = \max (140, 14 \times \text{densité moyenne})$$

où α_ℓ est exprimé en cwt et la densité en livres/pieds cubes.

c) Pour v = 6

La capacité d'un conteneur de 20 pieds est de 1280 pieds cubes (i.e. 8' × 8' × 20'). En suivant un raisonnement analogue au précédent, on obtient 102 cwt comme "chargement équivalent" minimal. Alors, pour tout service ℓ employant le mode v = 6, on a:

$$\alpha_\ell = \max (102, 10.2 \times \text{densité moyenne}).$$

d) Pour v = 7

La capacité d'un wagon de chemin de fer n'est pratiquement pas limitée par le poids de la marchandise générale transportée mais sera plutôt restreinte par le volume utilisé. On utilisera donc comme α_ℓ, pour les services faisant appel au mode v = 7, la capacité moyenne utilisée à la période précédente, avec un minimum de 230 cwt; i.e.

$$\alpha_\ell = \max (230, \text{capacité moyenne observée}).$$

Les activités dans les terminus

Pour chaque terminus j du réseau, les données suivantes sont nécessaires: les coûts unitaires de manutention C_j^c, en \$/cwt, les taux de ser-

vice de classification, μ_j, en cwt/heure, et le taux de déchargement des remorques, μ_j^r, en cwt/heure.

Un coût unitaire de manutention C_j^c propre à chaque terminus $j \in J$ est obtenu de la façon suivante [1]:

$$C_j^c = h_j^c \; / \; P_j^c \qquad \forall j \in J$$

où h_j^c = coût horaire des employés de manutention au terminus j, en $/heure-homme

P_j^c = productivité des employés de manutention au terminus j, en cwt/heure-homme.

Notons que la productivité des employés de manutention est une moyenne obtenue sur une période d'observation donnée et peut donc s'avérer fort différente des standards de productivité visés par la compagnie.

Quant aux taux de service de classification μ_j, ils sont obtenus comme suit:

$$\mu_j = \beta_j^c \; P_j^c \qquad \forall j \in J$$

où β_j^c = un facteur de capacité de classification propre à chaque terminus et établi en fonction de l'effectif total, du nombre de portes et de la configuration du terminus, en hommes.

---

1 Il s'agit ici d'une simplification car les coûts unitaires de manutention varient également en fonction des caractéristiques (e.g. poids, nombre de pièces par expédition) de la marchandise manutentionnée comme il est expliqué à la section 3.3.2.

Enfin, μ_j^r, le taux de déchargement des remorques, est obtenu par observation et varie beaucoup moins d'un terminus à l'autre que μ_j qui est plus sensible aux particularités de chaque terminus. C'est pourquoi nous avons adopté un seul taux de déchargement (μ_j^r = 111 cwt/heure) pour tous les terminus.

4.2.2 Résolution du problème-test

Le problème-test a été résolu à l'aide des méthodes décrites à la section 4.1. La méthode de solution a été programmée en FORTRAN et exécutée sur l'ordinateur CDC Cyber 835-855 du Centre de calcul de l'Université de Montréal.

Le tableau XIII nous donne les temps [1] d'exécution de différents modules de solution pour résoudre le problème-test sans toutefois rééquilibrer le réseau. On constate que la très grande partie du temps d'exécution des programmes, soit près de 80%, est consacrée à la distribution optimale du fret sur les itinéraires; ce qui implique, pour chaque marché: 1) la recherche d'un itinéraire à coût minimum, 2) son ajout, selon le cas, aux autres itinéraires générés antérieurement, et 3) la réoptimisation du flot de marchandises sur les itinéraires, incluant le calcul des dérivées. Nous avons donc cherché à améliorer la performance de cette partie de l'algorithme de solution en tentant de réduire le nombre de fois que l'on doit réoptimiser le flot sur les itinéraires. Pour ce fai-

---

1 Tous les temps sont équivalents à des secondes CPU sur un système Cyber 173.

TABLEAU XIII

Le temps d'exécution des modules de solution

Modules	Temps d'exécution (secondes)
. Détermination des itinéraires à coût minimum	260.1
. Optimisation du flot sur les itinéraires	162.7
. Calcul des dérivées	91.4
. Mise à jour des fréquences	66.7
. Total	540.6

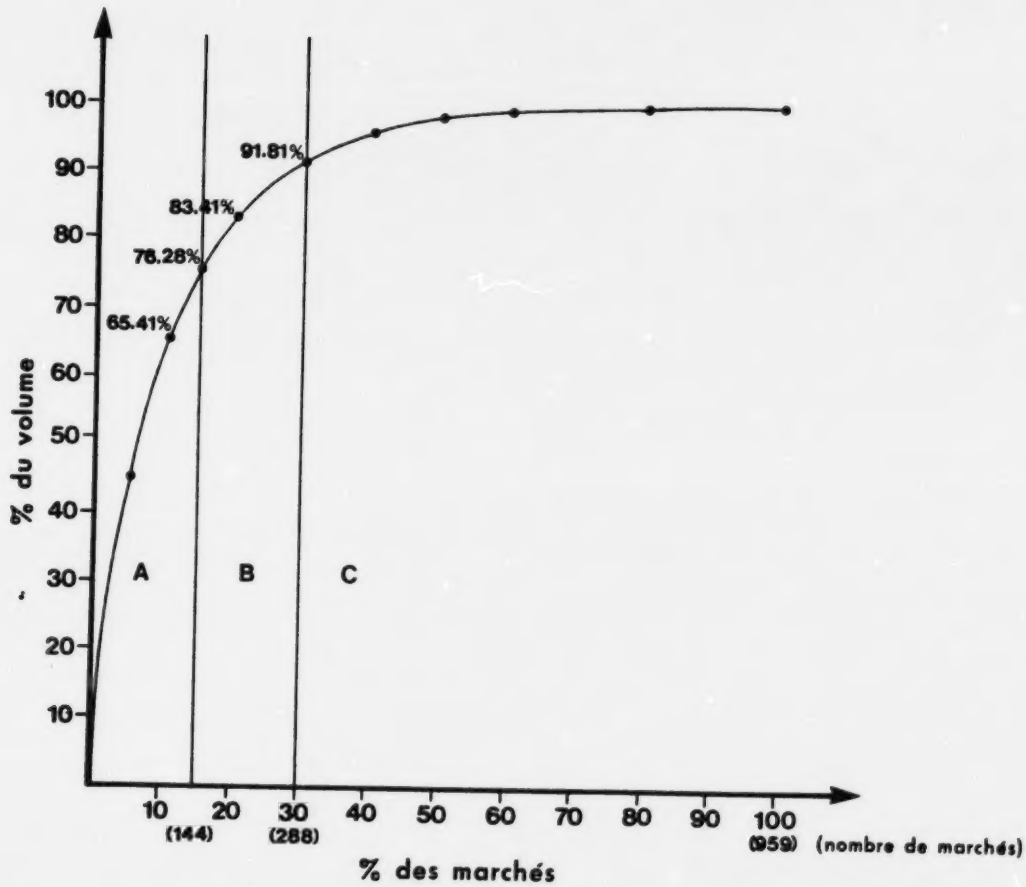
re, nous avons segmenté les marchés en nous appuyant sur une analyse du type ABC (loi de Pareto) illustrée à la figure VII. On s'aperçoit que les 959 marchés de la compagnie CNX peuvent être classés comme suit:

Classe A : La classe A comprend les 144 marchés les plus importants, soit seulement 15% de tous les marchés, qui représentent à eux seuls 76,28% de toute la demande (exprimée en cwt).

Classe B : La classe B comprend également 15% de tous les marchés. Ces marchés sont toutefois d'importance intermédiaire car ils génèrent une proportion de la demande (15,53%) à peu près égale à leur importance relative (15% des marchés).

FIGURE VII

Distribution des marchés selon leur importance relative



Classification des marchés:

. Classe A : 15% des marchés → 76.28% de la demande

. Classe B : 15% des marchés → 15.53% de la demande

. Classe C : 70% des marchés → 8.19% de la demande

Classe C : Les marchés les moins importants appartiennent à la classe C. Ils sont très nombreux (70% des marchés) mais représentent, somme toute, qu'une très faible partie de la demande totale, soit 8.19%.

Nous avons également constaté qu'en ne conservant que les 288 marchés les plus importants, soit ceux appartenant aux classes A et B, on excluait tous les marchés dont le volume hebdomadaire était inférieur à 100 cwt. A la lumière de ces résultats, nous avons décidé de modifier la procédure de distribution optimale du fret sur les itinéraires en optimisant, en alternance, les 288 marchés les plus importants appartenant aux classes A et B et ensuite, tous les 959 marchés. Cette stratégie nous a permis de réduire proportionnellement le temps d'exécution des programmes, sans pour autant modifier sensiblement la valeur de la fonction objectif.

Quant à la détermination des fréquences, nous avons suivi la procédure décrite à la section 3.1.1 en fixant les fréquences initiales à une valeur suffisante pour que chaque service puisse transporter tout le fret, soit des fréquences de 30 pour notre problème-test. Nous avons ensuite utilisé des pas Δ successifs de 15, 10, 2, 2, 1, -1, 1, -1, etc., jusqu'à ce que les améliorations obtenues soient négligeables. De plus, pour éviter les coûts de pénalité pour dépassement de capacité, on s'assure, à chaque itération, que les fréquences de service ne sont pas réduites en-dessous des fréquences nécessaires pour transporter la marchandise affectée à chacun des services, plus une certaine marge de sécurité, e.g. 25% dans notre cas. Cette stratégie nous a permis de résoudre le problème-test

dans un temps acceptable et avec une précision remarquable compte tenu de la taille et de la nature du problème.

Enfin, pour le rééquilibrage du réseau, nous avons testé plusieurs stratégies dans le but d'obtenir le compromis idéal entre un temps d'exécution plus rapide et une solution plus économique. Ainsi, il est possible d'éliminer tous les déséquilibres en une seule étape (voir section 3.1.3) puis de réoptimiser la distribution du fret après coup (option 1) ou encore de procéder par étapes, en éliminant un certain nombre de déséquilibres et en réoptimisant la distribution du fret à chaque étape (option 2). Nous avons également considéré d'autres variantes à l'algorithme proposé à la section 3.1.3; ainsi, nous avons examiné le cas où seuls les coûts de transport associés aux fréquences de service sont utilisés (au lieu des coûts marginaux calculés par différences finies) et où seuls les ajouts aux fréquences de services sont possibles (option A). Le dernier cas est celui où les coûts de transport sont utilisés et où l'on permet des diminutions de fréquence (option B). Il est sous-entendu que dans tous les autres cas, on utilise les coûts marginaux calculés par différences finies.

Le tableau XIV présente les résultats obtenus avant et après le rééquilibrage du réseau à l'aide de différentes stratégies ou combinaisons d'options. On peut constater que la meilleure solution équilibrée, i.e. celle dont le coût total est minimisé, est obtenue à l'aide de l'option 2, soit en utilisant l'algorithme décrit à la section 3.1.3 et en procédant par étapes avec des coûts marginaux calculés par différences

TABLEAU XIV

Comparaison des résultats obtenus à l'aide de différentes stratégies de solution pour le rééquilibrage du réseau

Critères de performance	Solution avant l'équilibrage	Solutions équilibrées suivant: Option 1	Option 2	Options 1A ou 2A[1]	Options 1B ou 2B[1]
a) Coûts ($)					
. Transport	454,144	579,320	578,373	587,763	576,183
. Manutention	64,575	64,672	64,698	64,705	65,708
. Dépassement de capacité	165	81	70	65	318
. Insatisfaction des marchés	52,229	46,284	46,287	45,581	105,698
. Total	571,113	690,357	689,428	698,114	747,907
b) Temps d'exécution (sec. CPU)					
. Générer les itinéraires	260.1	287.4	400.2	288.2	287.2
. Optimiser le fret sur les itinéraires	162.7	190.9	257.8	185.5	214.2
. Calculer les dérivées	91.4	107.7	146.3	106.0	123.2
. Mise à jour des fréquences	66.7	66.7	66.7	66.7	66.7
. Equilibrage seulement		81.5	313.8	58.9	86.9
. Total	540.6	622.1	854.4	599.5	627.5
c) Statistiques					
. Fréquences utilisées	1094	1364	1371	1382	1313
. Itinéraires utilisés	1197	1226	1257	1213	1267

1. Les deux options donnent sensiblement les mêmes résultats.

finies. On constate cependant que cette même solution (option 2) requiert le temps d'exécution le plus long. Or, on sait qu'une façon de réduire le temps d'exécution est d'éliminer tous les déséquilibres en une seule étape. C'est ce qu'on obtient justement avec l'option 1 qui nous donne tout de même une solution équilibrée à un coût total à peu près équivalent à celui obtenu avec l'option 2, i.e. à 0.13% près, mais avec un temps d'exécution considérablement amélioré. L'option 1 s'avère donc un compromis intéressant lorsque de nombreuses analyses doivent être

effectuées; c'est d'ailleurs celle que nous utilisons pour rééquilibrer le réseau dans toutes les analyses de sensibilité exécutées au chapitre suivant.

En retournant au tableau XIV, on se rend compte de l'importance des coûts associés au retour à vide des remorques. En effet, même dans le meilleur des cas (option 2), le coût total augmente de $118,315, soit une augmentation de 20.7% par rapport au coût de la situation obtenue avant de se soucier du rééquilibrage du réseau. La situation ne s'améliore pas si l'on ne tient compte que des coûts tangibles de transport et de manutention qui augmentent, à eux seuls, de $123,172, et ce, dans le meilleur des cas, soit l'option 1B ou 2B. Or, nous croyons que l'un des principaux avantages de notre modèle de planification globale est justement de prévenir ces coûts additionnels, soit en les épongeant par des revenus additionnels provenant de la vente de cette surcapacité de transport, soit en les éliminant par une réduction des fréquences de service engendrant les déséquilibres. Les résultats obtenus en rééquilibrant le réseau à l'aide de l'option 1A ou 2A nous indiquent justement ce qui se produit lorsque l'on ne permet pas l'élimination des fréquences de services dans l'algorithme de rééquilibrage appliqué à notre problème-test: le coût total augmente de $8686 par semaine et le nombre de fréquences de services utilisées atteint un maximum de 1382.

4.2.3 Validation et analyse des résultats

Nous examinons maintenant la question de la validité du modèle et nous présentons une analyse sommaire des résultats obtenus à partir des

données de la compagnie CNX pour le mois d'octobre 1982.

Validité du modèle

En abordant la question de la validité du modèle proposé dans cette thèse, il est important de noter qu'il vise à obtenir une solution optimale (modèle normatif) au problème de la planification globale des opérations et non pas à évaluer ou encore à simuler la performance de différents plans d'opération pour le transport des marchandises. Il n'est donc pas question de valider notre modèle en comparant sa performance, en termes de coûts et de niveaux de service, à celle qui s'est manifestée en réalité lorsque l'on utilise comme demande les données historiques d'octobre 1982. En fait, notre modèle devrait améliorer la performance passée en proposant une meilleure solution pour le transport des marchandises. C'est d'ailleurs ce que nous pouvons vérifier un peu plus loin lors de l'analyse des résultats de notre expérimentation.

Nous avons tout de même vérifié la validité de notre modèle, c'est-à-dire sa conformité à la réalité des opérations de transport routier des marchandises en lots brisés, en nous assurant que, d'une part, les éléments de coûts modélisés au niveau de la fonction objectif sont réalistes et que, d'autre part, notre modèle se comporte correctement, i.e. tel que prévu ou sinon, logiquement, lorsqu'il est soumis à différentes analyses de sensibilité.

Au niveau de la fonction objectif, la validité des coûts de transport et de manutention est assurée du fait qu'ils sont obtenus directement

à partir de coûts unitaires provenant de la compagnie et associés aux variables du modèle selon une relation qui est très bien définie et conforme à la réalité. Quant aux autres éléments de la fonction objectif, ce sont des coûts intangibles pénalisant des niveaux de service inadéquats et des dépassements de capacité. Dans ce dernier cas, on a fixé les coûts de pénalité à un niveau suffisamment élevé pour éviter des dépassements de capacité dans les solutions du modèle.

Dans le cas des coûts de pénalité pour service inadéquat, il est important que le modèle représente assez fidèlement les temps de transit ainsi que leur variance afin d'éviter que des réductions de coûts d'opération soient réalisées au détriment du service en acheminant de la marchandise sur des itinéraires trop longs ou pas assez fiables par rapport aux niveaux de service requis. Nous avons donc examiné très soigneusement les solutions obtenues à l'aide du modèle afin de nous assurer que les niveaux de service (temps de transit espérés et leur variance) prédits étaient réalistes compte tenu des fréquences de service et des itinéraires utilisés. Pour ce faire, nous avons utilisé deux approches distinctes. En premier lieu, nous avons comparé les niveaux de service moyens observés durant le mois d'octobre 1982 à ceux prédits par le modèle en utilisant les mêmes itinéraires et les mêmes fréquences de service. Cependant, cette approche s'est avérée plutôt imprécise dans le cas des marchés dont les itinéraires empruntent des services dont la fréquence est insuffisante pour transporter toute la marchandise qui leur est assignée. Bref, les niveaux de service de la marchandise voyageant sur de tels itinéraires sont affectés par les dépassements de capacité et non pas à cause du temps

de transit associé à ces itinéraires. Notre modèle normatif tient compte de cette situation en pénalisant les dépassements de capacité afin d'assurer que la demande de tous les marchés soit satisfaite, i.e. qu'aucune marchandise ne soit laissée sur les quais de chargement à la fin de la période de planification.

Donc, à cause des nombreux cas où la piètre performance de service observée était attribuable à des dépassements de capacité, nous avons également employé une autre approche de validation en ayant recours à l'expérience et au jugement des gestionnaires de la compagnie pour évaluer nos résultats et le bien-fondé de nos hypothèses. Ce processus empirique de validation nous a tout de même permis d'ajuster certaines données que nous avions mésestimées initialement comme, par exemple, la variance du temps de transport pour les services utilisant le rail comme mode de transport. Ce même processus nous a également permis de relever 56 marchés (environ 5,8% des marchés) pour lesquels la compagnie avait défini (assez arbitrairement) des normes de services (S_m) impossibles à atteindre, en moyenne; avec les services des transports disponibles à l'époque, i.e. tels que: $S_m < E(T_{k_m})$.

Analyse des résultats

Nous présentons maintenant les principaux résultats obtenus en expérimentant notre modèle à l'aide des données de la compagnie CNX pour le mois d'octobre 1982. Pour ce faire, le tableau XV compare les résultats obtenus à partir des trois cas suivants:

TABLEAU XV

Comparaison entre les résultats de la compagnie CNX et ceux obtenus à l'aide du modèle (données d'octobre 1982)

Critères de performance	Compagnie CNX (cas #1)	Modèle (avec les fréquences de CNX) (cas #2)	Modèle (cas #3)
a) Coûts (par semaine)			
. Transport	$548,623	$ 548,623	$480,323
. Manutention	46,256	107,198	65,353
. Sous-total	$594,879	$ 655,821	$545,676
. Dépassement de capacité	N/D	$ 171,436	$ 82
. Insatisfaction des marchés	N/D	576,387	102,138
. Total	N/D	$1,403,644	$647,896
b) Pourcentage des marchés ayant une fiabilité de 80% ou plus			
. par rapport aux marchés importants	20%	56%	76%
. par rapport à tous les marchés	N/D	45%	71%
c) Statistiques			
. Fréquences utilisées	1412	1412	1276
. Itinéraires utilisés	N/D	2722	1832

Cas #1 : Il s'agit de la performance réelle de la compagnie CNX telle que mesurée par son système d'information pour le mois d'octobre 1982.

Cas #2 : Les fréquences de service sont maintenues à leur valeur réelle d'octobre 1982 et le modèle est utilisé pour redistribuer la marchandise sur les itinéraires afin de minimiser la valeur de la fonction objectif.

Cas #3 : Le modèle est utilisé pour résoudre le problème, i.e. fixer les fréquences de service et distribuer la marchandise, à partir de la demande réelle d'octobre 1982.

Une brève analyse du tableau XV nous permet de constater qu'à l'époque, la compagnie CNX avait beaucoup de difficulté à offrir un service fiable à sa clientèle avec seulement 20% de réussite sur les quelque cent marchés importants pour lesquels la compagnie maintenait des indicateurs de performance de service. Cette situation s'explique, en bonne partie, par une surutilisation de certains services ayant pour conséquence de laisser des quantités importantes de marchandise sur les quais de chargement, faute d'espace dans les remorques. Cette explication se vérifie lorsque l'on examine les résultats obtenus dans le cas #2, i.e. en maintenant fixes les fréquences de service utilisées par CNX et en redistribuant la marchandise sur les itinéraires. On se rend compte en effet qu'une meilleure distribution du fret entraîne, certes, une augmentation des coûts de manutention mais également une amélioration sensible au ni-

veau de la fiabilité du service offert sur les marchés importants. On constate également que les coûts intangibles de dépassement de capacité sont très élevés dans le cas #2, et ce, même si la redistribution du fret nous a permis de réduire considérablement les taux d'utilisation des remorques par rapport au cas #1 où on observait plusieurs services ne pouvant pas transporter toute la marchandise qui leur était assignée. En fait, on peut supposer que les coûts de dépassement de capacité et d'insatisfaction des marchés seraient beaucoup plus élevés dans le cas #1 que dans le cas #2 si l'on pouvait les calculer en reconstituant tous les itinéraires utilisés en octobre 1982.

En comparant maintenant les résultats obtenus à l'aide de notre modèle, cas #3, à ceux des cas #1 et #2, deux mises en garde s'imposent. Tout d'abord, il n'est pas juste de comparer tout de suite les coûts de transport de la compagnie à ceux obtenus dans le cas #3 sans tenir compte du déséquilibre engendré par chacune des solutions. Nous reviendrons donc sur cette comparaison lors de l'analyse des solutions équilibrées. La deuxième mise en garde se rapporte aux coûts de pénalité pour insatisfaction des marchés. Ces derniers sont établis à partir de coûts unitaires qui ont été fixés à un niveau passablement élevé pour cette expérimentation afin de maximiser le service. En d'autres termes, il n'est pas évident que la compagnie aurait dû être pénalisée aussi durement (coûts intangibles d'environ un demi million de dollars par semaine) dans le cas #2. Ces coûts de pénalité ont d'ailleurs été recalibrés pour les analyses de sensibilité présentées au prochain chapitre. Il n'en demeure pas moins qu'une amélioration sensible du pourcentage de marchés importants

ayant une fiabilité de 80% et plus dans le cas #3 s'accompagne tout naturellement d'une diminution également sensible des coûts de pénalité pour insatisfaction des marchés; ce qui indique que notre modèle se comporte correctement à ce niveau.

Afin d'obtenir une base de comparaison valable pour les coûts de transport et de manutention, nous avons équilibré le réseau en ajoutant les fréquences de service nécessaires à cette fin. Les résultats obtenus sont présentés au tableau XVI. On constate que la solution obtenue à partir des fréquences de service fixées par la compagnie CNX, cas #2, est beaucoup plus près de l'équilibre que celle proposée par le modèle, cas #3, initialement. Il n'en demeure pas moins que le coût total est de beaucoup inférieur pour le cas #3 qui est même plus économique, en termes de coûts tangibles (transport et manutention), que le cas #2. Il est important de noter ici que les coûts intangibles de dépassement de capacité et d'insatisfaction des marchés ne seront vraiment modifiés que si les fréquences de service nécessaires pour équilibrer le réseau sont ajoutées avant la période de planification. C'est pourquoi ces nouveaux coûts sont inscrits entre guillemets au tableau XVI tandis que les pourcentages de fiabilité sont maintenus constants.

En terminant, nous présentons au tableau XVII les résultats obtenus en modifiant les coûts unitaires C_m d'insatisfaction des marchés. Tout d'abord, en réduisant C_m à zéro, on se trouve à éliminer de la fonction objectif la recherche d'un service rapide et fiable et on se concentre entièrement à la minimisation des coûts d'opération en maintenant, bien sûr, des pénalités pour dépassement de capacité. Bref, les solutions obtenues

TABLEAU XVI

Résultats obtenus selon deux cas, avant et après le rééquilibrage du réseau

Critères de performance	Avant rééquilibrage		Après rééquilibrage	
	Cas #2 (Fréquences fixées par CNX)	Cas #3 (Fréquences fixées par le modèle)	Cas #2	Cas #3
a) Coûts hebdomadaires de:				
. Transport	$ 548,623	$480,323	$ 590,716	$596,904
. Manutention	107,198	65,353	107,198	66,360
. Sous-total	$ 655,821	$545,676	$ 697,914	$663,264
. Dépassement de capacité	$ 171,436	$ 82	"$ 120,693"	"$ 493"
. Insatisfaction des marchés	576,387	102,138	" 488,566"	" 99,419"
. Total	$1,403,644	$647,896	$1,307,174	$763,176
b) Pourcentage des marchés ayant une fiabilité de 80% et plus				
. Selon marchés importants	56%	76%	56%	76%
. Selon tous les marchés	45%	71%	45%	71%
c) Statistiques				
. Fréquences utilisées	1412	1276	1506	1442
. Itinéraires utilisés	2722	1832	2722	2272

TABLEAU XVII

Résultats obtenus en faisant varier les coûts unitaires de pénalité pour insatisfaction des marchés

Critères de performance	Avant équilibre, avec C_n=0		Cas #3 (avec C_n recalibré)	
	Cas #2 (Fréquences fixées par CNX)	Cas #3 (Fréquences fixées par le modèle)	Avant équilibre	Après équilibre
a) Coûts hebdomadaires de:				
. Transport	$548,623	$426,191	$454,144	$578,373
. Manutention	102,706	62,440	64,575	64,698
. Sous-total	$651,329	$488,631	$518,719	$643,071
. Dépassement de capacité	$144,087	$ 375	$ 165	$ 70
. Insatisfaction des marchés	0	0	52,229	46,287
. Total	$795,416	$489,006	$571,113	$689,428
b) Pourcentage des marchés ayant une fiabilité de 80% et plus				
. Selon les marchés importants	47%	50%	67%	67%
. Selon tous les marchés	46%	35%	63%	63%
c) Statistiques				
. Fréquences utilisées	1412	942	1094	1371
. Itinéraires utilisés	2449	2127	1197	1257

pour les cas #2 et #3, en posant C_m égal à zéro, constituent des bornes inférieures pour les coûts tangibles de transport et de manutention tout en respectant les limites de capacité des remorques (ou en subissant les coûts de pénalité correspondant aux dépassements de capacité).

On présente également, au tableau XVII, les résultats obtenus en utilisant un coût de pénalité de service C_m plus conservateur [1] pour le cas #3. On s'aperçoit que, même après l'équilibrage du réseau, cette solution est de beaucoup supérieure, à la fois en termes de coûts et de fiabilité de service, à n'importe quelle solution obtenue à partir des fréquences de service utilisées par la compagnie (cas #2) en octobre 1982. On constate également, encore une fois, que notre modèle fonctionne correctement en recherchant des solutions de compromis entre la minimisation des coûts d'opération et un service rapide et fiable. En effet, lorsque le coût unitaire de pénalité C_m pour service insatisfaisant diminue de sa valeur initiale (tableau XVI) à sa valeur recalibrée (tableau XVII), non seulement les coûts de pénalité deviennent plus faibles, mais la fiabilité du service passe de 76% à 67% alors que les coûts tangibles d'opération diminuent simultanément de $545,676 à $518,719. Ceci illustre bien toute la flexibilité qu'offre notre modèle à l'utilisateur qui recherche un outil lui permettant de mieux comprendre les relations qui existent entre les coûts d'opération et les niveaux de service.

Bref, nous avons réussi à résoudre correctement, à l'aide de notre modèle et des méthodes de solution présentées dans ce chapitre, un problème

---

1 Le C_m recalibré est quatre fois moins élevé que le C_m original.

routier de marchandises en lots brisés. Nous considérons que les solutions obtenues à l'aide de notre modèle peuvent contribuer à améliorer sensiblement la performance des compagnies de transport routier des marchandises, et ce, non seulement au niveau de la planification globale mais aussi pour analyser une foule de décisions, comme nous le verrons au chapitre suivant où sont présentées les analyses de sensibilité.

CHAPITRE 5

Les analyses de sensibilité

Ce chapitre présente les résultats des nombreuses analyses de sensibilité effectuées à partir de la résolution du problème-test décrit au chapitre précédent. Nous examinons tout d'abord la sensibilité de la solution obtenue à des variations dans les paramètres du modèle tels la demande, la productivité des employés de manutention et la capacité des modes de transport. Nous analysons ensuite la sensibilité des coûts d'opération à des changements dans les niveaux de service requis afin de mieux comprendre les relations de compromis liant ces deux éléments du modèle. Nous illustrons enfin la capacité de notre modèle à répondre à des besoins spécifiques des gestionnaires en analysant, d'une part, la sensibilité de la solution à des modifications dans les caractéristiques des services utilisant le rail et, d'autre part, en procédant à des analyses de scénarios où l'on modifie la configuration du réseau de services.

5.1 Résultats obtenus en faisant varier des paramètres du modèle

L'objectif de cette section est d'étudier le comportement de la solution du problème-test décrit au chapitre 4 suite à des modifications dans la valeur de quelques-uns des principaux paramètres du modèle, soit: la demande pour l'ensemble de tous les marchés et pour quelques marchés spécifiques, la capacité de transport de tous les services utilisés et la productivité des employés de manutention.

5.1.1 Variations de la demande

La première analyse consiste à faire varier la demande de tous les marchés $m \in M$ de plus et moins 20% par rapport à la demande réelle $\bar{d}_m$ du mois d'octobre 1982. Les résultats sont présentés au tableau XVIII. On constate tout d'abord que la valeur de la fonction objectif varie un peu moins rapidement que la demande tout en suivant une relation à peu près linéaire avec elle. Ceci est dû à l'importance relative des coûts de transport qui varient en fonction des fréquences de service utilisées. Or, ces dernières connaissent également des fluctuations relativement moins prononcées que celles que l'on a fait subir à la demande. Il n'en demeure pas moins que des variations importantes (± 20%) dans le niveau général de la demande entraînent des modifications sensibles dans la valeur de la fonction objectif. C'est d'ailleurs l'un des objectifs de notre modèle de planification globale que de prévoir ces ajustements de l'offre de service aux variations dans la demande et d'en mesurer également l'impact au niveau du rééquilibrage du réseau.

En retournant au tableau XVIII, on s'aperçoit également que le nombre d'itinéraires utilisés pour transporter la marchandise des 959 marchés ne fluctue que très peu en fonction des variations dans la demande, et ce, malgré le nombre, parfois important, d'itinéraires générés par le modèle. On peut donc supposer que la solution obtenue, en termes de choix d'itinéaires, est relativement robuste par rapport à des variations dans le niveau de la demande. Cette hypothèse est renforcée du fait que le nombre d'itinéraires modifiés en faisant varier la demande demeure très

TABLEAU XVIII

Résultats obtenus en faisant varier le niveau général de la demande

Critères de performance	$d_m = 0.8\,\bar{d}_m$	$d_m = 1.0\,\bar{d}_m$	$d_m = 1.2\,\bar{d}_m$
a) Coûts hebdomadaires de			
. Transport (en $)	$382,959	$454,144	$530,892
(en %)	83.7%	100%	117.8%
. Manutention (en $)	52,269	64,575	76,160
(en %)	80.9%	100%	117.9%
. Dépassement (en $)	152	165	70
de capacité (en %)	92.1%	100%	42.4%
. Insatisfaction (en $)	42,595	52,229	65,845
des marchés (en %)	81.6%	100%	126.1%
. Total (en $)	$477,975	$571,113	$672,967
(en %)	83.7%	100%	117.8%
b) Statistiques			
. Fréquences utilisées	936	1094	1273
	85.5%	100%	116.4%
. Itinéraires générés	1889	1197	1235
. Itinéraires utilisés	1039	985	1007
. Nombre d'itinéraires modifiés pour les marchés dont le volume est supérieur à 100 cwt/période	31	0	20
. Pourcentage de tous les marchés ayant une fiabilité de 80% et plus	60%	63%	64%

faible, i.e. 31 et 20, pour les 288 marchés les plus importants dont le volume est supérieur à 100 cwt et qui représentent à eux seuls environ 92% de la demande.

Les exemples suivants illustrent comment certains marchés voient leurs itinéraires modifiés en fonction des variations dans la demande.

<u>1er cas</u>: le marché Halifax-Toronto

Les itinéraires suivants ont été proposés par le modèle en fonction des différents niveaux de demande:

(i) Pour $d_m = 0.8\,\bar{d}_m$

Halifax - Montréal - Toronto (101.2 cwt)
Halifax - Moncton - Montréal - Toronto (0.6 cwt).

(ii) Pour $d_m = 1\,\bar{d}_m$

Halifax - Montréal - Toronto (127.2 cwt).

(iii) Pour $d_m = 1.2\,\bar{d}_m$

Halifax - Toronto (152.7 cwt).

On s'aperçoit que lorsque le niveau général de la demande est faible, la marchandise doit être consolidée à Montréal pour être ensuite acheminée vers Toronto. Une faible proportion du fret, soit 0.6 cwt, doit être détournée par Moncton car il n'y a pas suffisamment de capacité sur le service reliant Halifax et Montréal. Dans ce cas, le modèle a déterminé qu'il était plus économique de subir des coûts additionnels de

manutention et de pénalité de service pour ces 0.6 cwt plutôt que d'ajouter une remorque entre Halifax et Montréal. D'un autre côté, lorsque le niveau général de la demande augmente de 20%, il devient préférable d'utiliser le service direct reliant Halifax et Toronto car on a maintenant suffisamment de marchandises de différents marchés empruntant ce service pour que sa fréquence soit assez grande pour satisfaire les normes de service du marché Halifax-Toronto, ce qui n'était pas le cas auparavant.

2e cas: le marché Montréal-Régina

(i) Pour $d_m = 0.8\,\bar{d}_m$

Montréal - Winnipeg - Régina (181.9 cwt).

(ii) Pour $d_m = 1\,\bar{d}_m$

Montréal - Winnipeg - Régina (188.2 cwt)
Montréal - Régina (39.2 cwt).

(iii) Pour $d_m = 1.2\,\bar{d}_m$

Montréal - Winnipeg - Régina (92.3 cwt)
Montréal - Régina (180.6 cwt).

Ici, on s'aperçoit qu'au fur et à mesure que le niveau général de la demande augmente, on cherche à utiliser davantage le lien direct entre Montréal et Régina. Dans ce cas, le modèle établit des compromis entre, d'une part, des coûts de manutention plus élevés en passant par Winnipeg et, d'autre part, des coûts de pénalité de service en empruntant le lien direct car la fréquence de service n'est pas assez élevée pour satisfaire les niveaux de service requis.

3e cas: le marché Toronto-Calgary

(i) Pour $d_m = 0.8\,\bar{d}_m$

Toronto - Calgary (791.1 cwt).

(ii) Pour $d_m = 1\,\bar{d}_m$

Toronto - Calgary (988.8 cwt).

(iii) Pour $d_m = 1.2\,\bar{d}_m$

Toronto - Calgary (1164.3 cwt)
Toronto - Edmonton - Calgary (22.3 cwt).

Dans ce cas, on voit qu'il est d'usage d'expédier la marchandise directement de Toronto à Calgary sauf lorsqu'il manque d'espace pour un très faible volume (22.3 cwt). On préférera alors expédier ce surplus de fret par Edmonton et ainsi encourir de légers frais supplémentaires de manutention (sans pénalité de service dans ce cas) au lieu d'ajouter un autre départ, ce qui serait beaucoup plus coûteux.

Bref, on constate encore une fois, que notre algorithme établit correctement les compromis entre les différents éléments de la fonction objectif du modèle. Il est important de rappeler ici, cependant, que notre démarche se situe au niveau de la planification tactique. Nous ne prétendons pas que la solution proposée par le modèle puisse être utilisée, sans aucune modification, au niveau opérationnel car notre solution s'appuie uniquement sur des prévisions de la demande et non pas sur la demande réelle comme ce serait le cas pour un modèle de planification au niveau opérationnel. Nous pouvons cependant déjà prévoir, au niveau tac-

tique, quels seront les itinéraires retenus pour chaque marché en fonction du niveau général de la demande et aussi selon les variations de la demande spécifique de chaque marché, si on le désire.

Pour illustrer ce dernier cas, voici ce qui se produit lorsque l'on augmente le volume d'un seul marché, en l'occurence Moncton-Québec, à partir de la demande d'octobre 1982, soit 44.2 cwt, jusqu'à 500 cwt.

(i) Pour la demande originale de 44.2 cwt:

Moncton - Bathurst - Québec (32.3 cwt)

et

Moncton - Montréal - Québec (11.9 cwt).

(ii) Pour une demande de 100 cwt:

Moncton - Bathurst - Québec (100 cwt).

(iii) Pour une demande de 200 cwt et de 300 cwt:

Moncton - Québec (2 remorques par semaine).

(iv) Pour une demande de 400 cwt:

Moncton - Québec (392.4 cwt, i.e. 2 pleines remorques)

et

Moncton - Bathurst - Québec (7.6 cwt, i.e. le surplus).

(v) Pour une demande de 500 cwt:

Moncton - Québec (3 remorques par semaine).

Dans cet exemple, au fur et à mesure que la demande augmente, on ajoute des départs pour le service direct reliant Moncton à Québec. De

plus, lorsque la demande n'est pas suffisante pour justifier l'ajout d'une autre remorque par semaine (et que les pénalités de service n'interviennent pas) on achemine le surplus de marchandises par un itinéraire indirect sur lequel on a suffisamment de capacité, e.g. les 7.6 cwt expédiés via Bathurst lorsque la demande est de 400 cwt.

5.1.2 Variations de la capacité des services de transport

Une façon d'accroître la productivité dans l'industrie du transport routier des marchandises a souvent été d'augmenter la capacité de l'équipement de transport. En effet, on expérimente de plus en plus l'utilisation de trains routiers (deux ou trois remorques tirées par un seul tracteur) et de remorques plus volumineuses, e.g. les nouvelles remorques de 48 pieds de longueur. Il est donc intéressant de mesurer la sensibilité de notre fonction objectif et particulièrement des coûts de transport par rapport à des variations dans la capacité de transport α_ℓ de l'ensemble de tous les services utilisés. Le tableau XIX présente les résultats obtenus en faisant fluctuer α_ℓ de 10% et 20% en plus et en moins de sa valeur observée $\bar{\alpha}_\ell$ pour octobre 1982.

On constate que la valeur de la fonction objectif, et particulièrement celle des coûts de transport, diminue de moins en moins rapidement au fur et à mesure qu'augmente la capacité des services de transport. Ce phénomène s'explique en partie par la relation existant entre la capacité α_ℓ des services de transport et le nombre de fréquences de service F_ℓ requises pour transporter des quantités X_ℓ de marchandises. Ainsi, par exem-

TABLEAU XIX

Résultats obtenus en faisant varier la capacité des services de transport

Critères de performance	$a_\ell = 0.8\bar{a}_\ell$	$a_\ell = 0.9\bar{a}_\ell$	$a_\ell = \bar{a}_\ell$	$a_\ell = 1.1\bar{a}_\ell$	$a_\ell = 1.2\bar{a}_\ell$
a) Coûts hebdomadaires de:					
. Transport	$538,234 (118.5%)	$494,699 (108.9%)	$454,144 (100%)	$424,504 (93.5%)	$404,695 (89.1%)
. Manutention	67,346	66,627	64,575	63,953	63,838
. Dépassement de capacité	526	36	165	152	72
. Insatisfaction des marchés	50,337	51,506	52,229	52,257	53,215
. Total	$656,443 (114.9%)	$612,868 (107.3%)	$571,113 (100%)	$540,866 (94.7%)	$521,820 (91.4%)
b) Statistiques					
. Fréquences requises pour que le taux d'utilisation des services soit inchangé	1367 (125%)	1216 (111.1%)	1094 (100%)	995 (90.9%)	912 (83.3%)
. Fréquences utilisées	1274 (116.5%)	1179 (107.8%)	1094 (100%)	1039 (95%)	1005 (91.9%)
. Capacité disponible ($F_\ell a_\ell$)	$1019a_\ell$ (93%)	$1061a_\ell$ (97%)	$1094a_\ell$ (100%)	$1143a_\ell$ (104.5%)	$1206a_\ell$ (110.2%)
. Taux d'utilisation ($X_\ell/a_\ell F_\ell$)	85.9%	82.5%	80%	76.6%	72.6%
. Capacité inutilisée	14.1%	17.5%	20%	23.4%	27.4%

ple, si l'on désire maintenir le taux d'utilisation global des services $X_\ell/a_\ell F_\ell$ à son niveau actuel, alors une diminution de 20% de la capacité totale des services a_ℓ se traduira par une augmentation de 25% du nombre de fréquences requises F_ℓ qui passera à 125% (100% divisé par 0.80) de sa valeur originale tandis qu'une augmentation de 20% de la ca-

pacité équivaudra, en fait, à une diminution des fréquences de service à 83.3% (ou 100% divisé par 1.20) de leur valeur originale. Les pourcentages de variation des fréquences requises pour maintenir le taux d'utilisation à sa valeur originale constituent donc une meilleure base de comparaison que les pourcentages de variation de capacité pour analyser les résultats présentés au tableau XIX.

Si l'on examine à nouveau la sensibilité des coûts de transport aux variations de la capacité des services, on s'aperçoit tout de même que les coûts de transport augmentent moins rapidement que prévu lorsque l'on diminue la capacité des services. Ceci s'explique tout simplement du fait que toute la capacité existente n'étant pas entièrement utilisée sur tous les services (on a un taux d'utilisation de 80%), une diminution de la capacité des services n'entraînera pas nécessairement une augmentation équivalente du nombre de fréquences de service. Inversement, une augmentation de la capacité des services ne donnera pas lieu à une diminution équivalente du nombre de fréquences de service utilisées car on voudra maintenir, dans plusieurs cas, un nombre de départs par période minimal, e.g. cinq par semaine, pour garantir un service rapide et fiable à la clientèle de ces marchés. Les statistiques présentées au tableau XIX démontrent en effet que les variations de la capacité α_ℓ sont compensées à la fois par des ajustements du nombre de fréquences de service F_ℓ et du taux d'utilisation global des services $X_\ell/\alpha_\ell F_\ell$.

5.1.3 Variations de la productivité des employés de manutention

Dans cette analyse, on fait varier la productivité des employés de manutention de plus et moins 20%, à chaque terminus du réseau. Ces modifications affecteront directement les paramètres suivants:

- les coûts unitaires de manutention C_j^c propres à chacun des terminus j et utilisés dans le calcul des coûts de manutention. Ces coûts étant inversement proportionnels à la productivité des employés de manutention, une réduction de 20% de cette dernière équivaut à une augmentation de 25% des coûts unitaires de manutention alors qu'une amélioration de 20% de la productivité signifie une réduction de 16.6% de C_j^c;
- les taux de service total μ_j ainsi que les taux de déchargement et de classification μ_j^r propres à chacun des terminus et affectant les temps de classification et leur variance.

Les résultats de cette analyse sont présentés au tableau XX. On peut constater l'ampleur des effets occasionnés par des variations de productivité sur non seulement les coûts de manutention mais également les coûts de transport et les pénalités pour insatisfaction des marchés. En effet, une réduction de 20% dans la productivité des employés de manutention (ou une augmentation de 25% des coûts unitaires de manutention) entraîne une augmentation d'environ 20% des coûts totaux de manutention ainsi qu'un accroissement des fréquences de service utilisées et, par conséquent, des coûts de transport. Cette dernière augmentation s'explique par le plus grand volume de marchandises évitant la reclassification à

TABLEAU XX

Résultats obtenus en faisant varier la productivité des employés de manutention

Critères de performance	Productivité réduite de 20% ($C_j^c = 1.25\ \bar{C}_j^c$)	Productivité originale ($C_j^c = 1\ \bar{C}_j^c$)	Productivité accrue de 20% ($C_j^c = 0.833\ \bar{C}_j^c$)
a) Coûts hebdomadaires de			
. Transport	$466,660 (+2.76%)	$454,144 (0%)	$443,864 (-2.26%)
. Manutention	$ 77,358 (+19.8%)	$ 64,575 (0%)	$ 56,225 (-12.9%)
. Dépassement de capacité	$ 70	$ 165	$ 173
. Insatisfaction des marchés	$ 55,979 (+7.18%)	$ 52,229 (0%)	$ 52,579 (+0.67%)
. Total	$600,067 (+5.07%)	$571,113 (0%)	$552,841 (-3.2%)
b) Statistiques			
. Fréquences utilisées	1113	1094	1091
. Marchandises reclassifiées	70,423 cwt (-2.02%)	71,873 cwt (0%)	74,066 cwt (+3.05%)
. Coût moyen de classification	$1.10/cwt (122.2%)	$0.90/cwt (100%)	$0.76/cwt (84.5%)

cause des coûts plus élevés de manutention, et par la réduction des taux de service μ_j et μ_j^r qui est compensée par l'utilisation d'un plus grand nombre d'itinéraires directs afin d'éviter des coûts de pénalité encore plus élevés.

On remarque aussi qu'une augmentation de la productivité engendre également des variations sensibles dans les coûts de manutention et de transport dont l'ampleur est relativement aussi importante que celle observée lorsque la productivité est réduite, si l'on se réfère aux pourcentages de variation des C_j^c. De plus, les variations du volume de marchandises reclassifiées dans certains terminus du réseau excèdent énormément celles observées globalement. Ainsi, alors que le volume total de marchandises reclassifiées augmente d'environ 3% lorsque la productivité est accrue de 20%, on observe des augmentations de l'ordre de 16% du volume de marchandises reclassifiées à Montréal et Winnipeg où les coûts unitaires de manutention sont relativement élevés par rapport à ceux observés dans les autres terminus, ce qui signifie qu'une amélioration de la productivité engendre des réductions de coût relativement importantes dans ces deux cas. Enfin, on constate que les coûts moyens de classification varient à peu près dans les mêmes proportions que les coûts unitaires de manutention C_j^c, la faible différence, environ 2%, étant due à des modifications dans le volume de marchandises reclassifiées d'un terminus à l'autre reflétant ainsi la recherche d'une meilleure distribution de la charge de travail.

5.2 Relations entre les coûts d'opération et les niveaux de service

Nous présentons maintenant les résultats de quelques analyses visant à démontrer l'importance des relations entre les coûts d'opération et les niveaux de service. Pour ce faire, nous avons fait varier les paramètres suivants, un à la fois: les coûts de pénalité C_m pour service inadéquat, la fiabilité P_m du service, les normes de service requises S_m pour certains marchés ainsi qu'une combinaison des deux dernières modifications.

5.2.1 Variations du coût de pénalité C_m

Le tableau XXI présente les résultats obtenus en faisant varier le coût de pénalité C_m pour service inadéquat de zéro jusqu'à quatre fois la valeur utilisée dans la solution originale. De cette façon, on obtient un aperçu de la relation existant entre les coûts tangibles de transport et de manutention et les niveaux de service exprimés en pourcentage de tous les marchés ayant une performance de service satisfaisante. Ainsi, on constate qu'avec un coût de pénalité C_m égal à zéro, on obtient un niveau de service satisfaisant pour 35% de tous les marchés, et ce, à un coût minimum. Cette performance est sensiblement améliorée lorsque l'on attribue à C_m une valeur non nulle. C'est ainsi que pour une valeur de C_m correspondant à seulement la moitié du coût de pénalité utilisé dans la solution originale, on obtient déjà une performance satisfaisante pour 60% de tous les marchés. On doit remarquer ici qu'une telle amélioration de la performance, de 35% à 60%, est obtenue en augmen-

TABLEAU XXI

Résultats obtenus en faisant varier le coût de pénalité C_m

Critères de performance	$C_m = 0$	$C_m = \frac{1}{2}\bar{C}_m$	$C_m = \bar{C}_m$	$C_m = 2\bar{C}_m$	$C_m = 4\bar{C}_m$
a) Coûts hebdomadaires de:					
. Transport	$426,191	$448,293	$454,144	$475,027	$480,323
. Manutention	62,440	63,800	64,575	64,989	65,353
. Sous-total	$488,631	$512,093	$518,719	$540,016	$545,676
. Dépassement de capacité	375	63	165	204	82
. Insatisfaction des marchés	0	32,746	52,229	71,039	102,138
. Total	$489,006	$544,902	$571,113	$611,259	$647,896
b) Statistiques					
. Pourcentage de tous les marchés ayant une fiabilité de 80% et plus	35%	60%	63%	69%	71%
. Fréquences utilisées	942	1063	1094	1174	1276

tant les coûts tangibles d'opération de $488,631 à $512,093 par semaine, soit une augmentation d'environ 4.8% par rapport au coût minimum.

En continuant à doubler successivement le coût de pénalité C_m, on réussit à améliorer graduellement la performance de service mais à un rythme beaucoup plus modeste et à un coût relativement plus élevé. En fait, il faut que les coûts de transport et de manutention augmentent à $545,676 par semaine, soit environ 6.6% de plus, pour que le pourcentage

de tous les marchés ayant un niveau de service satisfaisant passe de 60% à 71%. Cette relation de compromis entre les coûts d'opération et la performance de service est illustré à la figure VIII. On constate qu'il en coûte de plus en plus cher pour augmenter le nombre de marchés satisfaisant les niveaux de service requis. En examinant l'allure de la courbe illustrée à la figure VIII, on peut s'interroger sur la possibilité même de satisfaire tous les marchés. En fait, nous verrons plus loin que, dans certains cas, les normes de service ont été fixées à un niveau effectivement impossible à atteindre avec le réseau de service actuel; ce qui explique qu'il semble impossible ou du moins extrêmement coûteux d'obtenir une performance satisfaisant les niveaux de service pour tous les marchés.

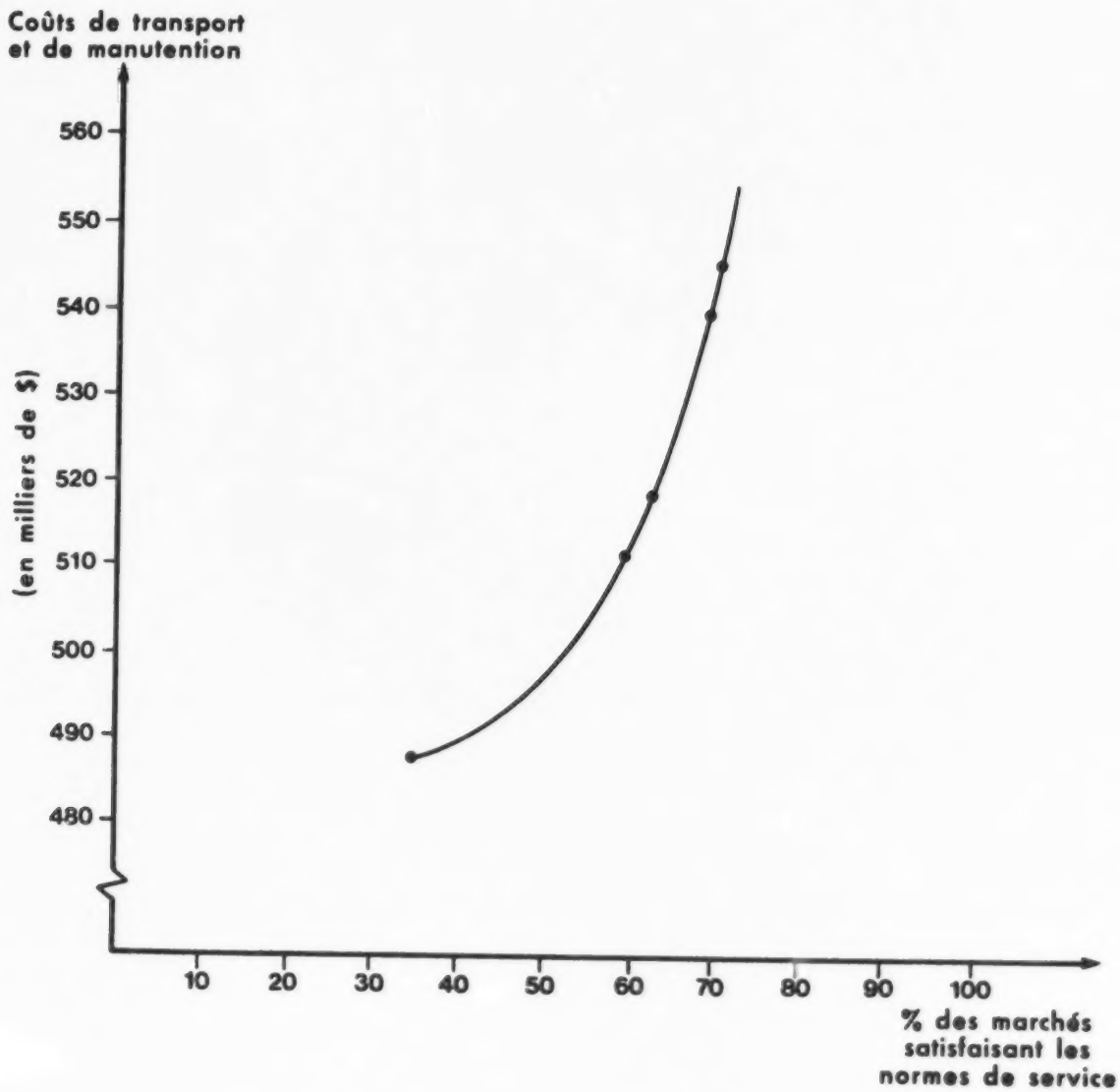
5.2.2 Variations de la fiabilité et des normes de service

On a vu au chapitre 3 que l'on tient compte de la fiabilité du service en ajoutant à la valeur espérée du temps de transit $E(T_{k_m})$ un certain nombre n de fois l'écart-type $\sigma(T_{k_m})$ de ce temps de transit pour calculer la pénalité associée à la non-satisfaction des marchés, i.e. pour calculer la valeur de:

$$\sum_{m \in M} \sum_{k_m \in K_m} C_m \, x_{k_m} \{\min[0, S_m - E(T_{k_m}) - n\,\sigma(T_{k_m})]\}^2$$

FIGURE VIII

Relation entre les coûts d'opération et la performance de service



Jusqu'à présent, nous avons utilisé une valeur de n correspondant au cas général, c'est-à-dire que n est calculé comme suit:

$$n = (1 - P_m)^{-\frac{1}{2}}$$

où P_m représente la fiabilité du service requis pour le marché m. Puisque nous avons toujours supposé que la fiabilité requise est de 80% pour tous les marchés, nous obtenons donc une valeur de n égale à environ 2.24, ce qui équivaudrait à une fiabilité de 98.7% si le temps de transit T_{k_m} obéissait à une loi normale plutôt qu'à une loi quelconque. Il est donc intéressant d'examiner ce qui se produit lorsque la valeur de P_m est modifiée. Dans la deuxième colonne du tableau XXII, on présente les résultats obtenus en réduisant P_m à zéro tout en maintenant les normes de service S_m inchangées. De cette façon, on obtient une valeur de n égale à un, ce qui signifie que, dans l'hypothèse où le temps de transit T_{k_m} est distribué selon une loi normale i.e. selon le cas normal, la fiabilité obtenue est de 84.1% au lieu de 98.7%. Bref, en réduisant la fiabilité requise pour l'ensemble des marchés, on obtient à la fois une solution plus économique et un plus grand nombre de marchés, soit 10% de plus, satisfaisant les niveaux de service S_m et P_m requis.

On peut aussi exprimer ces résultats de la façon suivante:

$E(T_{k_m}) + 2.24\,\sigma(T_{k_m}) \leq S_m$, pour 63% de tous les marchés $m \in M$

$E(T_{k_m}) + 1\,\sigma(T_{k_m}) \leq S_m$ pour 73% de tous les marchés $m \in M$.

TABLEAU XXII

Résultats obtenus en faisant varier la fiabilité P_m
et les normes de service S_m

Critères de performance	Solution initiale $P_m = 80\%$; $S_m = S_m$	$P_m = 0$ $S_m = S_m$	$P_m = 80\%$ S_m modifié	$P_m = 0$ S_m modifié
a) Coûts hebdomadaires de:				
. Transport	$454,144	$441,795	$452,121	$442,297
. Manutention	64,575	64,335	64,786	62,768
. Sous-total	$518,719	$506,130	$516,907	$505,065
. Dépassement de capacité	165	48	331	367
. Insatisfaction des marchés	52,229	20,710	26,671	9,022
. Total	$571,113	$526,898	$543,909	$514,454
b) Statistiques				
. Pourcentage de tous les marchés satisfaisant les niveaux de service requis	63%	73%	67%	77%
. Fréquences utilisées	1094	1045	1081	1027

Si les normes de service S_m ont été bien définies, on devrait être au moins capable d'affirmer que $E(T_{k_m}) \leq S_m$ pour tout $m \in M$. Malheureusement, on a identifié une cinquantaine de marchés qu'il était impossible de satisfaire à l'intérieur des normes de service S_m désirées compte tenu des caractéristiques actuelles du réseau de service. On a donc modifié les normes de service de ces 56 marchés en ajoutant 24 heu-

res et parfois même 48 heures à la valeur de S_m fournie par la compagnie. Les résultats obtenus suite à ces modifications de S_m sont présentés dans la troisième colonne du tableau XXII. En comparant ces résultats à ceux obtenus précédemment dans la solution initiale, on se rend compte que les coûts de pénalité pour insatisfaction des marchés ont diminué de moitié, ce qui est considérable par rapport au nombre relativement faible de marchés (56 sur un total de 959 marchés) pour lesquels on a modifié la norme de service requise S_m. On s'aperçoit également que les coûts tangibles d'opération diminuent légèrement car on peut maintenant utiliser des itinéraires plus économiques pour transporter la marchandise de ces marchés sans encourir d'énormes pénalités de service.

Dans le but de réduire encore davantage les coûts de pénalité associés à un service insatisfaisant, nous avons analysé l'effet combiné des deux modifications précédentes, c'est-à-dire la réduction de P_m à zéro et la modification de S_m pour 56 marchés. Les résultats obtenus sont présentés dans la quatrième colonne du tableau XXII. Comme on pouvait s'y attendre, le pourcentage de marchés satisfaisant les niveaux de service requis atteint un maximum à 77% tandis que les coûts de pénalité pour insatisfaction de marchés sont minimisés et que les coûts tangibles de transport et de manutention sont réduits d'environ $13,000 par semaine. Cette analyse illustre bien la sensibilité des coûts d'opération à la définition des niveaux de service S_m et P_m requis ou désirés par la compagnie de transport. Nous allons maintenant voir comment notre modèle peut être utilisé pour effectuer des analyses répondant à des besoins spécifiques des gestionnaires.

5.3 Quelques analyses de scénario

Dans cette section, nous présentons des analyses répondant à des questions du type: "Qu'est-ce qui arriverait si...?" On veut ainsi démontrer l'utilité de notre modèle quand il est nécessaire de répondre rapidement à des questions spécifiques portant sur les conséquences associées à des modifications dans le mode de fonctionnement des opérations du transporteur ou dans son environnement particulier. Nous avons donc choisi d'analyser, d'une part, les effets associés à des modifications dans le service de transport par rail et, d'autre part, les conséquences reliées à l'utilisation d'un terminus voué exclusivement à la consolidation à Toronto.

5.3.1 Modifications apportées au service de transport par rail

Un transporteur routier ayant recours aux chemins de fer pour le transport de ses remorques sur de longues distances peut être intéressé à évaluer les conséquences d'une diminution temporaire ou permanente du service de transport par rail. C'est pourquoi nous présentons les résultats de deux analyses: la première consiste à éliminer tous les services partant de Toronto et empruntant le rail comme mode de transport tandis que la deuxième évalue les effets associés à des augmentations du temps requis pour le transport T_ℓ pour tous les services empruntant le rail.

Les résultats de la première analyse sont présentés au tableau XXIII. On constate tout d'abord que le coût total augmente légèrement.

TABLEAU XXIII

Résultats obtenus en éliminant les services quittant le terminus de Toronto et empruntant le rail comme mode de transport

Critères de performance	Solution originale	Nouvelle solution
a) Coûts hebdomadaires de:		
. Transport	$454,144	$452,438
. Manutention	64,575	68,746
. Dépassement de capacité	165	256
. Insatisfaction des marchés	52,229	53,063
. Total	$571,113	$574,503
b) Statistiques		
. Fréquences utilisées	1094	1102
. Nombre de services éliminés	-	7
. Nombre de départs éliminés		47
. Nombre d'itinéraires modifiés	-	66
. Volume de marchandises reclassifiées (en cwt)	71,873	76,937

Ceci est normal car s'il avait été optimal de ne pas utiliser les sept services éliminés dans cette analyse, leur fréquence aurait été nulle dans la solution originale. La marchandise affectée par l'élimination des 47 départs de service par rail est redistribuée sur des itinéraires moins directs qu'auparavant et nécessitant plus de reclassification. Par exemple, la marchandise qui était transportée auparavant par rail, directement de Toronto à Winnipeg, doit maintenant passer par Thunder Bay pour être acheminée à Winnipeg par la route. C'est pourquoi on peut observer des augmentations dans le volume de marchandises reclassifiées et, par conséquent, dans le coût de manutention. En empruntant des itinéraires indirects, la marchandise affectée par l'élimination des services de rail requiert plus de temps pour se rendre à destination, ce qui entraîne des coûts de pénalité plus élevés pour insatisfaction des marchés et des économies dans les coûts de transport à cause de la consolidation.

La deuxième analyse porte sur des augmentations du temps pris pour le transport T_ℓ par les services utilisant le rail comme mode de transport. Les résultats sont présentés au tableau XXIV. On constate tout d'abord une diminution graduelle du nombre de fréquences de services utilisant le rail au profit des services de route. Lorsque la durée du transport T_ℓ augmente de 20%, on s'aperçoit que la solution retenue est plus coûteuse à cause du plus grand nombre de services de route utilisés pour le transport sur de longues distances alors que ce type de transport est normalement moins dispendieux par le chemin de fer. Lorsque la durée du transport par rail augmente encore à 1.4 et 1.6 fois T_ℓ, on constate que le transfert des marchandises vers les services de route n'est plus suf-

TABLEAU XXIV

Résultats obtenus en augmentant le temps requis pour le transport T_ℓ pour tous les services utilisant le rail

Critères de performance	$T_\ell = \bar{T}_\ell$	$T_\ell = 1.2\bar{T}_\ell$ (rail)	$T_\ell = 1.4\bar{T}_\ell$ (rail)	$T_\ell = 1.6\bar{T}_\ell$ (rail)
a) Coûts hebdomadaires de:				
. Transport	$454,144	$463,345	$473,828	$488,968
. Manutention	64,575	64,918	70,921	74,439
. Département de capacité	165	46	78	143
. Insatisfaction des marchés	52,229	56,083	68,226	74,253
. Total	$571,113	$584,192	$613,053	$637,803
b) Fréquences utilisées				
. Services de rail	403	372	345	261
. Services de route	691	735	787	877
. Tous les services	1094	1107	1132	1138
c) Volume de marchandises reclassifiées (cwt)	71,873	72,769	77,555	83,152

fisant comme mesure compensatoire et qu'il faut en plus, utiliser davantage d'itinéraires indirects, augmentant ainsi le volume de marchandises reclassifiées et, par conséquent, les coûts de manutention et d'insatisfaction des marchés car les itinéraires indirects sont généralement plus longs.

Cette analyse revêt une importance particulière pour toute entreprise de transport routier ayant recours au rail pour le transport de ses remorques sur de longues distances. En effet, on peut observer au

tableau XXIV la très grande sensibilité des résultats obtenus suite à des augmentations de la durée du transport par rail. Or, ces augmentations peuvent paraître assez fortes mais il faut se rappeler que l'on a supposé que les valeurs de T_ℓ étaient constantes dans le problème-test. Autrement dit, on suppose que $\sigma(T_\ell) = 0$ pour tous les services. C'est pourquoi il nous semble important de mesurer l'impact associé à des augmentations importantes de T_ℓ afin de tenir compte de la plus grande variabilité observée dans le temps requis pour le transport par rail.

5.3.2 Modifications apportées à la configuration du réseau

Dans cette section, nous désirons analyser le scénario suivant: "Qu'est-ce qui arriverait si l'on ouvrait à Toronto un terminus voué exclusivement à la consolidation?" Il s'agit, en fait, d'une décision qui a été prise par les dirigeants de la compagnie CNX en 1982 et qui a modifié la configuration du réseau de services en 1983. En ouvrant un terminus de consolidation à Toronto, on voulait atteindre le double objectif d'améliorer le service à l'intérieur de l'Ontario et de diminuer les coûts de transport, particulièrement ceux associés au retour à vide des remorques.

Ce qui distingue un terminus voué exclusivement à la consolidation des autres terminus du réseau, c'est qu'aucune opération de cueillette et livraison n'y est effectuée. Ainsi, la marchandise destinée à Toronto sera réacheminée vers un autre terminus, qui peut être situé à proximité du terminus de consolidation, pour y être triée selon les

routes de livraison. Bref, un terminus voué exclusivement à la consolidation est une plaque tournante reliant des terminus d'origine et de destination où la marchandise est consolidée pour des économies de transport. Un tel terminus n'étant pas limité dans son fonctionnement par les arrivées et départs des camions de cueillette et livraison, les horaires d'arrivée et de départ des remorques peuvent être mieux synchronisés afin de minimiser le temps d'attente des marchandises. En fait, un des principaux avantages de ce type de terminus, c'est que le temps moyen d'attente entre deux départs de remorque peut être considérablement réduit car il n'est plus nécessaire d'attendre le lendemain soir pour quitter le terminus avec la marchandise ramassée durant la journée. A partir des données réelles recueillies en 1983, cela signifie que les délais de fréquence et leur variance seront respectivement de 2 heures et 1.33 heures^2 pour un tel terminus. Ces changements, à eux seuls, sont évalués au tableau XXV.

On constate tout d'abord que le volume de marchandises reclassifiées à Toronto augmente d'environ 3400 cwt par semaine, et ce, au détriment des terminus avoisinants comme Brampton, Hamilton et Pickering. Cette augmentation du volume de marchandises en transit à Toronto est due exclusivement à la réduction du temps de reclassification car les coûts de classification n'ont pas été modifiés à Toronto: ils sont toujours presque deux fois supérieurs à ceux des terminus avoisinants. Il va sans dire qu'une telle situation provoque une augmentation des coûts de manutention qui est cependant largement compensée par l'amélioration de la performance de service se traduisant par une réduction importante dans les coûts d'insatisfaction des marchés.

TABLEAU XXV

Résultats obtenus en ajoutant un terminus de consolidation à Toronto

Critères de performance	Configuration originale	Après l'ajout d'un terminus de consolidation
a) Coûts hebdomadaires de:		
. Transport	$454,144	$457,296
. Manutention	64,575	66,509
. Sous-total	$518,719	$523,805
. Dépassement de capacité	165	120
. Insatisfaction des marchés	52,229	43,009
. Total	$571,113	$566,934
b) Volume de marchandises reclassifiées à:		
. Brampton	11 170 cwt	10 767 cwt
. Hamilton	2 099	1 542
. Pickering	3 765	1 668
. Toronto	6 647	10 025
. Tous les terminus	71 873	71 801

Cette première analyse est cependant incomplète car on sait que la productivité dans le nouveau terminus de Toronto, voué exclusivement à la consolidation, sera meilleure que celle qui prévalait dans l'ancien terminus, ce qui affectera également les coûts de manutention [1]. Nous avons donc évalué les différents scénarios présentés au tableau XXVI où la productivité du nouveau terminus varie de 9.3 cwt/heure, soit celle de l'ancien terminus, à 13.2 cwt/heure, soit la productivité observée au nouveau terminus en 1983, pour ensuite doubler et tripler la productivité actuelle à 18.6 et 27.9 cwt/heure.

Les résultats présentés au tableau XXVI illustrent bien jusqu'à quel point le nouveau terminus de consolidation de Toronto réussit à attirer un volume croissant de marchandises en fonction de l'augmentation de la productivité de ses employés. Il en résulte une diminution progressive des coûts de manutention et une amélioration générale du service. Cet accroissement du volume en transit à Toronto s'accompagne cependant d'une augmentation du nombre d'arrivées et de départs de remorques par semaine à ce terminus, ce qui se traduit ultimement par une légère augmentation des coûts de transport. En résumé, pour une productivité de 13.2 cwt/heure, on peut constater que l'avènement d'un nouveau terminus de consolidation à Toronto entraîne des économies tangibles (transport et manutention) de $3,307 par semaine par rapport à la solution originale (tableau XXV) en plus de réduire les coûts d'insatisfaction des marchés d'environ 23%.

---

1 Cette amélioration de la productivité est surtout attribuable à un meilleur aménagement physique des lieux et à des méthodes de travail plus efficaces.

TABLEAU XXVI

Résultats obtenus en faisant varier la productivité dans le nouveau terminus de consolidation à Toronto

Critères de performance	Productivité de Toronto			
	9.3 cwt/heure	13.2 cwt/heure	18.6 cwt/heure	27.9 cwt/heure
a) Coûts hebdomadaires de:				
. Transport	$457,296	$452,965	$452,928	$457,437
. Manutention	66,509	62,447	58,200	51,932
. Sous-total	$523,805	$515,412	$511,128	$509,369
. Dépassement de capacité	120	111	217	161
. Insatisfaction des marchés	43,009	40,352	36,718	37,049
. Total	$566,934	$555,875	$548,063	$546,579
b) Statistiques				
. Volume en transit:				
- à Toronto	10,025 cwt	15,124 cwt	21,411 cwt	25,891 cwt
- dans tous les terminus	71,801 cwt	70,854 cwt	71,128 cwt	71,615 cwt
. Fréquences utilisées	1098	1095	1126	1142
. Nombre d'arrivées à Toronto	130	147	172	191
. Nombre de départs de Toronto	133	152	183	200

En terminant, on peut s'interroger sur l'écart grandissant entre le nombre d'arrivées et de départs de remorques à Toronto. Autrement dit, on devrait mesurer l'impact de l'ouverture du nouveau terminus sur l'équilibre entre le nombre d'arrivées et de départs à chaque terminus du réseau et selon le type d'équipement utilisé. Pour ce faire, nous avons rééquilibré le réseau, en une seule étape (voir option 1, chapitre 4), pour chacun des scénarios. Les principaux résultats obtenus sont présentés au tableau XXVII.

TABLEAU XXVII

Résultats obtenus en rééquilibrant le réseau selon différents scénarios

Critères de performance	Solution originale	Avec le nouveau terminus à Toronto et une productivité		
		9.3 cwt/heure	13.2 cwt/heure	18.6 cwt/heure
a) Coûts hebdomadaires de:				
. Transport	$579,320	$582,820	$576,907	$586,140
. Manutention	64,672	66,765	62,353	58,320
. Sous-total	$643,992	$649,585	$639,260	$644,460
. Dépassement de capacité	81	122	131	85
. Insatisfaction des marchés	46,284	37,602	38,038	31,967
. Total	$690,357	$687,309	$677,429	$676,512
b) Statistiques				
. Fréquences utilisées	1364	1370	1365	1407
Δ fréquences	0	+6	+1	+43
Δ coûts de transport	0	+$3,500	-$2,413	+$6,820

En premier lieu, on doit constater qu'avec un niveau de productivité de 13.2 cwt/heure, on améliore à la fois les coûts d'opération et les coûts d'insatisfaction des marchés par rapport à la solution originale, tout en rééquilibrant le réseau. On s'aperçoit cependant que tel n'est pas nécessairement le cas pour d'autres niveaux de productivité. En effet, le nombre de fréquences requises pour rééquilibrer le réseau varie en fonction du déséquilibre engendré (en plus ou en moins)

par la variation du volume de marchandises attirées à Toronto selon les différentes hypothèses de productivité. Ainsi, une amélioration de productivité de 13.2 à 18.6 cwt/heure accentue le déséquilibre en attirant plus de remorques à Toronto, ce qui entraîne une augmentation des coûts de transport de $6,820 pour rééquilibrer le réseau par rapport à la solution originale. En pratique, il serait donc plus économique de maintenir le volume de marchandises reclassifiées au niveau établi pour une productivité de 13.2 cwt/heure et de profiter des gains en productivité sans changer quoi que ce soit à la solution obtenue, en termes de fréquences de service et d'itinéraires. Ce faisant, on se trouve néanmoins à renoncer à une amélioration de la performance de service telle que représentée par la réduction des coûts d'insatisfaction des marchés.

Cette dernière analyse illustre bien l'importance de tenir compte de l'équilibre du réseau dans toute analyse de scénario visant à modifier la configuration d'un réseau de services. En guise de conclusion, on peut affirmer que les analyses de sensibilité et de scénario contenues dans ce chapitre nous ont permis de:

1) confirmer la validité de notre modèle en analysant le comportement des solutions proposées suite à de nombreux changements dans les paramètres du modèle;

2) mieux comprendre les relations de compromis existant entre les coûts d'opérations, d'une part, et les niveaux de service, d'autre part;

3) démontrer la versatilité et l'utilité de notre modèle pour répondre à des besoins spécifiques des gestionnaires par l'analyse de scénarios.

CONCLUSION

Nous croyons que cette thèse peut contribuer à améliorer la performance des entreprises de transport routier des marchandises en proposant, pour la première fois à notre connaissance, un modèle normatif de planification afin d'obtenir des solutions de compromis entre la minimisation des coûts d'opération et la recherche d'un service rapide et fiable. Le modèle proposé dans cette thèse se veut un outil de planification permettant aux gestionnaires de déterminer, pour une période de planification donnée, la nature et la fréquence des itinéraires et services de transport utilisés pour satisfaire la demande prévue. En connaissant d'avance la nature des déséquilibres prévus entre le nombre de remorques expédiées et reçues à chaque terminus, on pourra également chercher à minimiser les coûts associés au retour à vide des remorques.

La gestion des opérations de transport routier des marchandises étant un domaine relativement peu étudié par le passé, il nous est apparu nécessaire d'aborder cette thèse avec un premier chapitre décrivant l'environnement particulier dans lequel les entreprises de camionnage évoluent au Canada en insistant davantage sur les problèmes et méthodes de gestion caractérisant ces entreprises. C'est également au chapitre 1 que nous avons démontré la nécessité d'aborder les problèmes de gestion des opérations dans ces entreprises avec une approche globale intégrant à la fois les composantes opérationnelles du système de transport et les niveaux de service requis.

Après avoir défini le problème spécifique faisant l'objet de cette thèse, soit la planification globale des opérations de transport routier des marchandises en lots brisés, le chapitre 2 dresse un état des connaissances reliées à ce problème. On a pu constater l'absence, jusqu'à tout récemment, de modèles visant à résoudre ce problème. Les quelques modèles existants ont été décrits en insistant tout particulièrement sur celui de Powell et Sheffi (1983) qui, à notre connaissance, est le seul autre modèle normatif visant à atteindre les mêmes objectifs que nous. On a également prêté une attention particulière au travail de Crainic (1982) qui a proposé un modèle de planification tactique pour le transport ferroviaire des marchandises dont nous nous sommes inspirés pour formuler le modèle proposé dans cette thèse.

C'est au chapitre 3 que nous suggérons une nouvelle formulation pour un modèle normatif de planification globale des opérations de transport routier des marchandises en lots brisés. Ce modèle a la forme générale d'un modèle d'optimisation non-linéaire mixte et fait appel à des notions de services et d'itinéraires semblables à celles proposées par Crainic (1982). Nous avons de plus présenté une formulation originale des coûts de pénalité associés à des itinéraires trop lents et peu fiables en apportant un soin particulier à la modélisation des phénomènes de files d'attente se produisant au niveau des terminus. Ce chapitre se termine par la présentation d'une nouvelle approche pour réduire les coûts associés au déséquilibre du réseau et, par conséquent, au retour à vide des remorques.

Compte tenu de la structure particulière du modèle proposé et de la grande taille des problèmes rencontrés en pratique, nous avons adopté, au chapitre 4, une approche de décomposition s'inspirant de la méthodologie décrite par Crainic et Rousseau (1984). Cette approche consiste à résoudre alternativement les sous-problèmes de détermination des fréquences de service et de distribution optimale du fret jusqu'à ce que l'on ne puisse plus apporter d'améliorations sensibles à la fonction objectif en modifiant les fréquences de service. Cette méthode de solution est complétée en proposant un nouvel algorithme de rééquilibrage du réseau qui possède suffisamment de flexibilité pour tenir compte des prévisions de ventes de chargements complets et des compromis entre un temps d'exécution plus rapide et une meilleure distribution du fret.

Ces méthodes de solution ont été testées sur des données réelles provenant de la division des Messageries du C.N. Les résultats obtenus sont présentés au chapitre 4. Nous avons réussi à résoudre le problème-test dans un laps de temps satisfaisant, compte tenu de la taille et de la complexité du problème, en apportant quelques améliorations aux méthodes de solution. Par exemple, une analyse de type ABC nous a permis de constater que les 288 marchés les plus importants, soit 30% de tous les marchés, représentaient à eux seuls environ 92% de toute la demande. Cette observation nous a permis d'accélérer le temps de résolution du problème en redistribuant, en alternance, tout le fret et ensuite seulement le fret généré par les 288 marchés importants.

Nous avons présenté, au chapitre 5, les résultats de nombreuses analyses de sensibilité et de scénarios effectuées à partir du problème-

test décrit au chapitre 4. Le comportement des solutions obtenues suite aux nombreux changements apportés aux paramètres du modèle est venu confirmer la validité du modèle proposé dans cette thèse. De plus, ces analyses nous ont permis de mieux comprendre les relations de compromis entre les coûts d'opération et les niveaux de service. Enfin, différentes analyses de scénarios sont venues démontrer la versatilité et l'utilité du modèle proposé dans cette thèse pour répondre à des besoins spécifiques des gestionnaires.

Nous sommes encore loin toutefois d'un véritable système d'aide à la prise de décision pour le transport routier des marchandises. Pour ce faire, il nous faudra améliorer les moyens d'interface avec le monde des gestionnaires. A cette fin, il nous semble que l'utilisation en mode interactif d'outils graphiques sur ordinateur soit une avenue de recherche très prometteuse.

Il serait également souhaitable d'expérimenter le modèle proposé dans cette thèse sur d'autres réseaux de taille et de configuration différentes. On pourrait ensuite l'intégrer à d'autres modules de planification (e.g. cueillette et livraison, manutention dans les terminus, entretien de l'équipement) afin de développer un véritable logiciel de planification globale pour toutes les activités de transport routier des marchandises. Il serait également logique de poursuivre des recherches en vue d'améliorer la gestion opérationnelle, i.e. en temps réel, des opérations de transport routier. Ceci peut se faire en développant des outils interactifs qui faciliteront la prise de décision concernant les

ajustements quotidiens à apporter au plan global des opérations, un peu à la façon de Barker et al. (1981).

Au niveau des applications potentielles du modèle proposé dans cette thèse, nous croyons qu'en plus de servir à la planification globale des opérations, il pourrait également s'avérer fort utile pour faciliter l'analyse de décisions stratégiques affectant la réorganisation physique de réseaux de transport (e.g. ouverture et fermeture de terminus, nouvelles routes, fusion d'entreprises, etc.). Nous pensons également utiliser l'approche développée dans cette thèse et dans celle de Crainic (1982) pour concevoir un modèle de planification globale pour le transport multimodal de marchandises afin d'étudier l'offre de services de transport au niveau macro-économique, e.g. pour une région donnée.

Bref, nous croyons avoir contribué à faire avancer un domaine de recherche important, mais nous sommes également conscients qu'il ne s'agit là que d'une étape en vue d'atteindre un objectif plus global, soit le développement d'outils d'aide à la prise de décision pour la gestion des opérations de transport des marchandises.

REMERCIEMENTS

Cette thèse est le fruit de longues années de travail auquel plusieurs personnes et organismes ont contribué de diverses façons. Qu'il me soit permis de les remercier même s'il est difficile, en quelques lignes, de leur exprimer toute ma gratitude.

Tout d'abord, je tiens à remercier Gilbert Laporte, professeur à l'Ecole des H.E.C., qui a guidé mes pas depuis le tout début de mon entrée au programme de doctorat en administration. Sa très grande compétence, sa disponibilité et ses sages conseils ont largement contribué à l'achèvement de cette thèse. Je veux également exprimer ma reconnaissance envers Jean-Marc Rousseau, professeur au département d'informatique et de recherche opérationnelle et directeur du Centre de Recherche sur les Transports (C.R.T.), qui a co-dirigé ma thèse avec Gilbert Laporte. Jean-Marc est un directeur de recherche fort compétent et efficace. C'est en bonne partie grâce à lui et aux ressources du C.R.T. qu'il a mises à ma disposition que cette thèse a vu le jour.

Je tiens aussi à souligner l'apport de Richard Loulou, professeur à la Faculté d'administration de l'université McGill et membre de mon comité de thèse, pour ses précieux conseils sur la formulation du modèle proposé dans ce travail. Je suis également reconnaissant envers Teodor Crainic, dont le travail a inspiré cette thèse, pour son aide et ses commentaires éclairés et envers Réjean Lessard qui, en plus de programmer les algorithmes de solution utilisés, a contribué à en améliorer l'effi-

cacité. Je veux également souligner l'excellent travail de Roseline Dugas qui a dactylographié ce texte.

Je remercie les autorités du C.N. de m'avoir autorisé à utiliser les données de la division des Messageries pour l'expérimentation du modèle. En particulier, je veux exprimer ma gratitude envers M. Claude Perron qui, jusqu'à l'an dernier, agissait à titre de président de la compagnie CNX et envers mon ami Michel Ravacley, anciennement directeur de la planification chez CNX, qui m'a beaucoup aidé à mieux comprendre les opérations et les données de transport routier des marchandises.

Je suis aussi reconnaissant envers les organismes suivants:

- Mon employeur, l'université du Québec à Montréal, pour m'avoir accordé un congé de perfectionnement en 1982-83 sans lequel cette thèse aurait sans doute été retardée.
- La compagnie SUNCOR qui a reconnu mes efforts en m'accordant, en 1982, une bourse d'études qui fut grandement appréciée.
- Les gouvernements du Québec et du Canada qui ont contribué financièrement à cette recherche par l'entremise des organismes suivants: FCAC, CRSH et Transports Canada, (PUT).

Enfin, je voudrais dire merci à tous ceux, parents et amis, qui ont contribué indirectement à la réalisation de cette thèse par leur soutien moral et leur amitié. En terminant, il n'existe pas de mots assez forts pour exprimer toute la gratitude que je ressens à l'endroit de mon épouse Suzanne et de mes enfants Martin et Caroline qui, par

leurs sacrifices, leur tolérance, leurs encouragements, bref, par leur amour, ont largement contribué à l'achèvement de cet ouvrage.

BIBLIOGRAPHIE

ALARY, J. "L'A.C.Q. présente à ses membres son projet de modification à l'ordonnance générale 4995 sur le camionnage", Transport routier du Québec, septembre 1981, p.5.

ALARY, J. "Les nouvelles règles du jeu", Transport routier du Québec, vol.39, no 7, septembre 1983, pp.6-8.

ANTHONY, R.N. Planning and Control Systems: a Framework for Analysis, Division of Research, Graduate School of Business, Harvard University, Boston, 1965.

BAILEY, N.T.J. "On Queuing Processes with Bulk Service", J.R. Stat. Soc. B, 16, 1954, pp.80-87.

BARKER, H.H., SHARON, E.M., SEN, D.K. "From Freight Flow and Cost Patterns to Greater Profitability and Better Service for a Motor Carrier", Interfaces, vol.11, no 6, décembre 1981, pp.4-20.

BAZARAA, M.S., SHETTY, C.M. Non-Linear Programming: Theory and Algorithms, John Wiley & Sons, New York, 1979.

BENEDETTI, C. Introduction à la gestion des opérations, Mondia, Laval, 1980.

BOUCHER, Michel. "La réglementation de l'industrie québécoise du camionnage: aperçu et considérations analytiques", L'Actualité économique, no 1, janvier-mars 1981, pp.87-112.

BOWERSOX, D.T. Logistical Management, Second edition, MacMillan Publishing Co., New York, 1978.

BUFFA, E.S. Modern Production Management-Managing the Operations Function, 5e édition, John Wiley & Sons, New York, 1977.

BUREAU DES TARIFS DU QUEBEC INC. Mémoire soumis respectueusement à l'Honorable Lucien Lessard, Ministre des transports, travaux publics et de l'approvisionnement, Montréal, le 15 mars 1977.

CHAUDHRY, M.L., TEMPLETON, J.G.C. A First Course in Bulk Queues, John Wiley & Sons, New York, 1983.

CHOW, G. "The Status of Economies of Scale in Regulated Trucking: a Review of the Evidence and Future Directions", Proceedings of the 1978 Transportation Research Forum Meeting, 1978, pp.365-373.

CRAINIC, T.G. "Un modèle de planification tactique pour le transport ferroviaire des marchandises", Thèse de Ph.D., Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, Publication #247, janvier 1982.

CRAINIC, T.G., ROUSSEAU, J.-M. "Multicommodity, Multimode Freight Transportation: a General Modelling and Algorithmic Framework for the Service Network Design Problem", Publication #332, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, février 1984.

CRAINIC, T.G., FERLAND, J.-A., ROUSSEAU, J.-M. "A Tactical Planning Model for Rail Freight Transportation", Transportation Science, vol.18, no 2, May 1984, pp.165-184.

DIAMOND, J. "Caractéristiques des coûts et des capitaux de l'industrie canadienne du camionnage", Commission canadienne des transports - Direction de la recherche, Rapport no. 20-80-05F, septembre 1980.

DOWNTON, F. "Waiting Time in Bulk Service Queues", J.R. Stat. Soc. B, vol.17, 1955, pp.256-261.

DOWNTON, F. "On Limiting Distributions Arising in Bulk Service Queues", J.R. Stat. Soc. B, vol.18, 1956, pp.265-274.

FLANNERY, M. "Route Engineering Can Zap High Distribution Costs", Canadian Transportation & Distribution Management, novembre 1980, pp.52-56.

GAVISH, B. "A Decision Support System for Managing the Transportation Needs of a Large Corporation", présenté au "Workshop on Distribution Management", Sogesta, Urbino, Italy, 10-14, September 1979.

GEOFFRION, A.M. "Management Support Systems for Distribution Planning", présenté au "Workshop on Distribution Management", Sogesta, Urbino, Italy, 10-14, September 1979.

GEOFFRION, A.M., POWERS, R.R. "Facility Location Analysis is Just the Beginning", Interfaces, vol.10, no 2, 1980, pp.22-30.

GEOFFRION, A.M., POWERS, R.R. "Management Support Systems", Western Management Science Institute, Working paper #287B, September 1979.

GOSSELIN, C. "Le camionnage: ce qu'il pourrait être si...", Conférence au Centre de Recherche sur les Transports, Montréal, 22 janvier 1983.

HARITOS, Z., ELLIOTT, A. "Canadian Transportation Regulation: Trends and Issues", Transportation, vol.12, 1983, pp.3-20.

JABRANNE, A., ROY, J. "Numerical Results and Approximate Formulas for Bulk Service Queues with Constant Service Times", Publication #378, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, 1984.

KALLMAN, E.A., GUPTA, R.C. "Top Management Commitment to Strategic Planning: an Empirical Study", Managerial Planning, May/June 1979, pp.34-38.

KEARNEY, A.T. Inc. Measuring Productivity in Physical Distribution, Report prepared for the National Council of Physical Distribution Management, 222 Adams St., Chicago, Ill., 1978.

KOROLUK, K. "Ontario Trucking Rules Likely to be Simplified by '86", Daily Commercial News, Toronto, 7 novembre 1983, p.B1.

LALONDE, B.J., ZINSZER, P.A. Customer Service: Meaning and Measurement, Chicago, Ill.: The National Council of Physical Distribution Management Inc., 1976.

LAPIERRE, L. Note sur l'industrie du camionnage au Québec, Ecole des H.E.C., Montréal, 1977.

LITTLE, J.D.C. "Decision Support for Marketing Management", Working paper 1019-78, Sloan School of Management, M.I.T., September 1978.

MAYRAND, A. "La réglementation dans l'industrie du camionnage au Québec", Institut d'économie appliquée, Ecole des H.E.C., août 1977.

McGINNIS, M.A. "Shipper Attitudes Towards Freight Transportation Choice: a Factor Analytic Study", International Journal of Physical Distribution & Materials Management, vol.10, no 1, 1980, pp.25-34.

MEYER, P.L. Introductory Probability and Statistical Applications, 2nd edition, Addison-Wesley, Reading Mass., 1970.

MINISTERE DES TRANSPORTS DU QUEBEC. Pour une approche concertée du transport des marchandises, Bibliothèque nationale du Québec, 2e trimestre 1982.

MINISTERE DES TRANSPORTS DU QUEBEC. Les voies de l'avenir - La recherche et le développement en transport, Bibliothèque nationale du Québec, 2e trimestre 1983.

MINISTERE DES TRANSPORTS DU QUEBEC. Analyse du coût et de la productivité du transport de marchandises générales en lots brisés au Québec, Service du Développement, Direction du Transport terrestre des marchandises, Québec, avril 1983.

MODER, J.J., ELMAGHRABY, S.F. Handbook of O.R., vol.1, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1978.

MORITZ, E.P. "Cost Benefit Analysis: Effective Measurement of Motor Carrier Operations - The Impact of Institutional and Market Structures", Transportation Journal, Summer 1978, pp.40-55.

PERRON, J.M. "La réglementation, pourquoi?", Exposé lors du congrès annuel de l'association du camionnage du Québec, 6 avril 1979.

PETERSEN, E.R. "Bulk Service Queues: with Application to Train Assembly Time", Document de travail #U-2, Canadian Institute of Guided Ground Transport, Université Queen's, Kingston, Ontario, août 1971.

PETERSEN, E.R. "Railyard Modelling - Part I: Prediction of Put-Trough Time", Transportation Science, vol.11, no 1, 1977(a), pp.37-49.

PETERSEN, E.R. "Railyard Modelling - Part II: The Effect of Yard Facilities on Congestion", Transportation Science, vol.11, no 1, 1977(b), pp.50-59.

PICARD, J. "The Issue of Authority in Multinational Corporations' Logistics Decisions", Working paper #80-16, McGill University, 1980.

POWELL, W.B. "Stochastic Delays in Transportation Terminals - New Results in Theory and Application of Bulk Queues", Thèse de Ph.D., M.I.T., Cambridge, MA, 1981.

POWELL, W.B. "Approximate, Closed Form Moment Formulas for Bulk Arrival, Bulk Service Queues", Publication EES-82-17, Princeton University, Princeton N.J., septembre 1982.

POWELL, W.B. "Analysis of Vehicle Holding and Cancellation Strategies in Bulk Arrival, Bulk Service Queues", Publication EES-81-12, Princeton University, Princeton, N.J., révisé en février 1983.

POWELL, W.B., SHEFFI, Y. "The Load Planning Problem of Motor Carriers: Problem Description and a Proposed Solution Approach", Transportation Research-A, vol.17A, no 6, 1983, pp.471-480.

ROBERTS, P.O. Communication privée, M.I.T. et Booz, Allen & Hamilton, 1982.

ROY, J. "Une approche globale aux problèmes de gestion des opérations dans les entreprises de transport des marchandises", Routes et Transports, Numéro 31, juin 1982, pp.10-19.

ROY, J., RAVACLEY, M. "A Customer Selectivity Approach to Operations at CN Express", INFOR, vol.20, no 1, février 1982, pp.28-39.

RYDER TRUCK LINES, Inc. "Management Information System and Incentive Program", Document interne, 1er novembre 1978.

SCHIFF, M. Accounting and Control in Physical Distribution Management, Chicago, Ill.: The National Council of Physical Distribution Management Inc., 1972.

STOCK, J.R., LALONDE, B.J. "The Purchasing Approach to Transportation Mode Selection", Journal of Purchasing and Materials Management, Spring 1978, pp.2-5.

TAFF, C.A. Management of Physical Distribution and Transportation, Richard D. Irwin Inc., Homewood, Ill., sixième édition, 1978.

TERZIEV, M.N., RICHARDSON, F.W., ROBERTS, P.O. "An Approach for the Evaluation of Freight Network Operations: a Stochastic Supply Model of the Regular Route Motor Carrier Industry", Proceedings of the Transportation Research Forum, 19th Annual Meeting, 1978.

THE RESEARCH BUREAU. Carrier and Equipment Preference Study of Canadian Traffic and Distribution Managers, Southam Business, Publishing Ltd., 1976.

TURNQUIST, M.A., DASKIN, M.S. "Queuing Models of Classification and Connection Delay in Railyards", Transportation Science, vol.16, no 2, mai 1982, pp.207-230.

WYCKOFF, D.D. Organizational Formality and Performance in the Motor-Carrier Industry, Lexington Books, D.C. Heath and Company, Lexington, M.A., 1974.

WYCKOFF, D.D., MAISTER, D.H. The Motor-Carrier Industry, Lexington Books, D.C. Heath and Company, Lexington, M.A., 1977.